This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

600043591S

G. 11. 13. 4.

E. BIBL. RADCL.

C

19691 e. 28.

OXFORD MUSEUM.

LIBRARY AND READING-ROOM.

THIS Book belongs to the "Student's Library."

It may not be removed from the Reading Room without permission of the Librarian.

IV. E. 14

COURS SPÉCIAL

SUR

L'INDUCTION, LE MAGNÉTISME DE ROTATION, LE DIAMAGNÉTISME.

L'Auteur et l'Éditeur de cet ouvrage se réservent le droit de le traduire ou de le faire traduire en toutes les langues. Ils poursuivront, en vertu des Lois, Décrets et Traités internationaux, toutes contrefaçons, soit du texte, soit des gravures, ou toutes traductions faites au mépris de leurs droits.

Le dépôt légal de cet ouvrage a été fait à Paris dans le cours du mois de septembre 1854, et toutes les formalités prescrites par les Traités sont remplies dans les divers États avec lesquels la France a conclu des conventions littéraires.

Tout exemplaire du présent Ouvrage qui ne porterait pas, comme ci-dessous, la griffe du Libraire-Éditeur, sera réputé contrefait. Les mesures nécessaires seront prises pour atteindre, conformément à la loi, les fabricants et les débitants de ces Exemplaires.

Mallet-Bachelier

PARIS. — IMPRIMERIE DE MALLET-BACHELIER,
rue du Jardinet, 12.

COURS SPÉCIAL

SUR

L'INDUCTION, LE MAGNÉTISME DE ROTATION, LE DIAMAGNÉTISME,

ET SUR LES

RELATIONS ENTRE LA FORCE MAGNÉTIQUE ET LES ACTIONS MOLÉCULAIRES;

PAR

M. CH. MATTEUCCI,

PROFESSEUR DE PHYSIQUE A L'UNIVERSITÉ DE PISE.

PARIS,

MALLET-BACHELIER, GENDRE ET SUCCESSEUR DE BACHELIER,

IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE IMPÉRIALE POLYTECHNIQUE.

QUAI DES AUGUSTINS, 55.

1854.

L'Auteur et l'Éditeur de cet ouvrage se réservent le droit de traduction.

A

F. ARAGO ET M. FARADAY,

QUI ONT FAIT LES DEUX PLUS GRANDES DÉCOUVERTES DÉCRITES DANS CE COURS,

LE MAGNÉTISME DE ROTATION ET L'INDUCTION.

ORIGINE ET BUT DE CET OUVRAGE.

Occupé, depuis plusieurs années, de recherches expérimentales sur le magnétisme par rotation, sur l'induction et sur le diamagnétisme, j'ai saisi l'occasion d'un Cours spécial professé à Pise, au mois de juin 1853, pour exposer les résultats de ces recherches. Telle est l'origine de cette publication, dans laquelle je n'ai pu me borner à décrire mes propres travaux, mais j'ai dû, en même temps, les coordonner avec l'état actuel de nos connaissances.

Dans la compilation de ce Cours je devais éviter, d'une part, de m'arrêter trop longuement sur des résultats déjà connus ou sur des généralités théoriques; de l'autre, de m'étendre dans des descriptions trop minutieuses de mes propres recherches, sans manquer, toutefois, à la clarté nécessaire pour les faire comprendre.

J'ai eu à lutter avec une difficulté encore plus grave, celle d'écrire dans une langue qui m'est étrangère, et qui a le mérite d'être la plus adaptée à l'exposition des sujets scientifiques, à la seule condition d'être employée avec propriété et avec exactitude. Si je n'eusse consulté que mon insuffisance, ces obstacles m'auraient arrêté, d'autant plus que le grand ouvrage de M. Becquerel sur l'électricité et sur le magnétisme, et celui que M. de La Rive vient de faire paraître sur le même sujet, et qui est remarquable

par l'ordre, la clarté et les vues générales, traitent avec une grande étendue des matières dont je me suis occupé dans ces leçons. Mais je n'ai pu renoncer à l'avantage de soumettre à un plus grand nombre de juges compétents des travaux qui me semblent conduire à des résultats nouveaux et importants, ni résister au désir de signaler aux expérimentateurs les voies qu'il faudrait suivre pour faire avancer cette partie de la physique.

La science de l'électricité et du magnétisme, quoique enrichie dans ces derniers temps par les découvertes les plus brillantes, est cependant la branche de la philosophie naturelle qui possède le moins de ces faits élémentaires et de ces principes généraux dont la physique mathématique pourrait s'emparer, et que l'imagination la plus ardente du géomètre s'efforcerait en vain de chercher sans l'appui de l'expérience. C'est donc à la découverte des lois élémentaires des phénomènes décrits dans ce Cours et à la recherche d'une hypothèse pour les expliquer, que tous nos efforts doivent tendre.

Un cadre, où ces phénomènes si nombreux et si variés seraient rapprochés par leurs analogies, où les lacunes seraient mises en évidence, ne peut manquer d'être un aide utile et opportun à l'expérimentateur. Si j'ai réussi à former ce cadre et à publier en même temps mes recherches, je serai largement récompensé des peines que la rédaction de ce livre m'a coûtées.

Pise, le 30 juillet 1853.

COURS SPÉCIAL

SUR

L'INDUCTION, LE MAGNÉTISME DE ROTATION, LE DIAMAGNÉTISME

ET LES RELATIONS ENTRE LA FORCE MAGNÉTIQUE ET LES ACTIONS MOLÉCULAIRES

PREMIÈRE LEÇON

Phénomènes généraux de l'induction électrodynamique et électromagnétique.

J'ai choisi pour sujet de notre cours spécial de cette année, les phénomènes et les lois de l'induction électrodynamique et électromagnétique, le magnétisme de rotation, le diamagnétisme et les relations entre la force magnétique et les actions moléculaires. Les rapports toujours plus intimes qui embrassent ces phénomènes entre eux et leur relation avec les forces et les propriétés moléculaires, m'ont paru des raisons suffisantes pour justifier le choix de ce groupe de connaissances physiques; d'ailleurs ce sujet avait pour moi l'avantage et l'attrait de m'obliger à coordonner et à exposer méthodiquement une partie de la science de l'électricité, sur laquelle j'ai fait dans ces dernières années une longue série de recherches. Je me propose d'étudier dans les trois premières leçons de ce cours les phénomènes de l'induction développée

dans les métaux. Je décrirai d'abord les propriétés et les lois des courants induits dans les conducteurs filiformes. Les courants produits dans ces conducteurs sont les plus intenses de tous ceux qu'on a obtenus par induction, et les seuls jusqu'ici dont on a pu comparer les différents effets avec ceux des autres courants électriques. Je donnerai à cette étude préliminaire toute l'étendue possible. Nous passerons ensuite à l'induction développée dans les masses métalliques et nous étudierons ce phénomène, certainement plus complexe que le précédent, en commençant par le cas dans lequel la masse induite par son mouvement de rotation ou par celui de l'aimant éprouve une action inductrice variable dans ses différents points; nous verrons après le cas encore plus général, celui dans lequel la distance absolue entre l'aimant et la masse induite restant constante, certains points de cette masse sont animés d'un mouvement relatif différent. La troisième leçon tout entière sera réservée à déterminer la distribution des états électriques développés par induction sur le disque tournant de M. Arago.

C'est à Faraday que l'on doit la découverte de l'induction.

Ce savant, déjà célèbre par ses expériences sur la rotation électromagnétique et sur la liquéfaction de certains gaz, communiqua à la Société royale de Londres, dans la séance du 24 novembre 1831, la découverte de l'induction électrodynamique et électromagnétique. Son Mémoire embrasse tous les cas de l'induction et en résume les principaux sous une formule très-simple à laquelle l'expérience n'a presque plus rien ajouté depuis.

L'appareil le plus propre à montrer les phénomènes principaux de l'induction électrodynamique consiste

(*fig.* 1) en deux spirales planes *a* et *b*, fixées verticalement et parallèlement entre elles sur des planches de bois ou sur des pieds de cristal qui peuvent se rapprocher à volonté. Chacune de ces spirales se compose d'un fil de cuivre de 25 à 30 mètres de longueur et de 1 millimètre de diamètre, couvert de soie et roulé en forme de spirale plane sur une couche de cire étendue à la surface d'une lame de bois, ou convenablement cousue sur un morceau de drap et fixée avec du vernis de gomme laque. Je joins les deux extrémités d'une des spirales à celles d'un bon galvanomètre à fil court dont le système magnétique doit être suffisamment astatique. En faisant passer un courant de 8 à 10 éléments de Grove dans l'autre spirale, on voit de suite apparaître les phénomènes de l'induction. Supposons que les deux spirales soient fixées à la distance de 10 millimètres, et nous verrons l'aiguille du galvanomètre poussée jusqu'à 40 ou 50 degrés au moment où je ferme le circuit. Cette aiguille, bien qu'on laisse le circuit voltaïque fermé, retourne immédiatement à sa position d'équilibre, et, après quelques oscillations, elle s'arrête de nouveau à zéro. En ouvrant alors le circuit, une nouvelle déviation du même nombre de degrés a lieu, mais en sens contraire de la première.

Il suffit de noter quelle est la direction du courant dans la spirale qui forme le circuit voltaïque pour reconnaître que le premier courant d'induction est en sens contraire de celui de la pile, et que, par conséquent, le second courant induit est dans le même sens. J'appellerai désormais *courant négatif* ou *inverse* celui qui se développe au moment où l'action du courant commence, et *positif* ou *direct* celui qui a lieu lorsque ce courant vient à cesser. Je m'empresse de vous montrer les mêmes phénomènes d'induc-

tion obtenus d'une manière qui peut paraître différente. Fixons les deux spirales planes à la distance de $0^m,15$ à $0^m,20$, et laissons le circuit de la pile fermé. Nous verrons alors qu'en faisant mouvoir l'une des spirales contre l'autre ou toutes les deux en même temps, un courant négatif se développe et cesse ensuite quand le mouvement des spirales est fini, comme nous l'avons vu précédemment après avoir laissé fermé le circuit de la pile. En éloignant l'une des spirales de l'autre ou toutes les deux en même temps, c'est alors le courant induit positif qui se produit, comme on l'avait obtenu en ouvrant le circuit de la pile.

De quelque manière donc que l'action d'un circuit voltaïque sur un circuit fermé commence, se prolonge ou cesse, les phénomènes électriques qui apparaissent dans le circuit induit sont les mêmes.

Il y a pourtant une différence qu'il importe de signaler et qui a lieu lorsque l'induction est développée par le mouvement des deux spirales plutôt que par la *fermeture* ou l'*ouverture* du circuit inducteur; c'est que, dans le premier cas, l'intensité du courant induit dépend de la rapidité de ce mouvement. Ainsi, je puis vous faire voir que l'aiguille du galvanomètre est à peine déviée si les deux spirales s'approchent ou s'éloignent lentement entre elles, tandis qu'en les faisant mouvoir rapidement, les courants induits sont presque aussi forts que ceux qu'on obtient en fermant et en ouvrant le circuit pendant que les deux spirales sont fixées dans la position la plus rapprochée. La différence est due évidemment à l'action contraire que le magnétisme terrestre exerce sur l'aiguille proportionnellement à la durée du développement du courant induit. En employant un galvanomètre dont le système est bien astatique et l'oscillation très-lente, on obtient par le mouve-

ment des spirales les mêmes déviations qu'on a en fermant ou en ouvrant le circuit de la pile toutes les fois que ce mouvement se fait dans un temps à peu près égal à celui employé par l'aiguille à commencer sa déviation.

Pour obtenir des courants induits plus forts, accompagnés d'étincelles, de secousses musculaires et d'effets électrolytiques, au lieu des spirales planes, nous employons deux spirales cylindriques (*fig.* 2) dont l'une *c*, d'un fil plus gros, est destinée pour le courant de la pile, et l'autre, composée d'un plus grand nombre de tours, sert pour le courant induit.

Ces mêmes phénomènes d'induction, quoique beaucoup plus faibles, se produisent entre deux fils ou deux lames métalliques qu'on place parallèlement et à une très-petite distance : on emploie pour cela un courant inducteur assez fort et l'on a dans le circuit induit un galvanomètre à fil court dont le système est bien astatique. Il est à peine nécessaire de faire remarquer comment l'action inductrice, si faible dans cette disposition, augmente en transformant les conducteurs filiformes et rectilignes en deux spirales planes ou cylindriques, car alors l'action de chaque unité de longueur du fil voltaïque s'étend sur un plus grand nombre d'unités de fil induit.

Si au lieu de placer parallèlement les fils conducteurs, on les dispose à angle droit, il n'y a plus de courants induits développés. Pour vérifier ce résultat, il suffit de rapprocher deux spirales cylindriques en tenant leurs axes tantôt parallèles et tantôt perpendiculaires entre eux.

En vous rappelant les lois de l'électromagnétisme et l'hypothèse d'Ampère, vous concevrez comment Faraday parvint à compléter sa découverte de l'induction en substituant aux spirales planes et aux cylindres électrodynami-

ques des aimants artificiels, ou mieux encore des électro-aimants temporaires. Un barreau aimanté qu'on approche ou qu'on éloigne normalement d'une spirale plane, le même barreau introduit ou retiré du cylindre électrodynamique *a* (*fig* 2), un morceau de fer doux entouré d'une spirale qui tourne en face des pôles d'un aimant en forme de fer à cheval, donnent tous des courants induits sujets à la même loi quant à la direction et à la durée : on peut toujours se rendre compte de la direction des courants induits par les aimants artificiels ou par les électro-aimants, en les représentant, comme on le fait dans l'hypothèse d'Ampère, par des cylindres électrodynamiques.

Il suffit d'approcher ou d'éloigner du pôle d'un barreau aimanté ou d'un électro-aimant un fil métallique qui fait partie du circuit du galvanomètre pour obtenir un courant induit. Ce n'est que quand ce fil se meut dans le plan de l'axe magnétique que l'induction est nulle ; si l'on emploie un électro-aimant très-fort en forme de fer à cheval, on trouve le même résultat en tenant le fil métallique réuni au galvanomètre dans le plan de la ligne polaire pendant qu'on ferme ou qu'on ouvre le circuit ou en faisant mouvoir le fil dans ce plan. Voici les phénomènes qu'on obtient lorsqu'on place un fil métallique communiquant avec le galvanomètre entre les deux pôles d'un électro-aimant en fer à cheval et qu'on le fait mouvoir avec son milieu autour du centre du champ magnétique. Si l'on tourne la portion induite du fil à droite ou à gauche en partant de la position qu'on appelle *équatoriale*, ou perpendiculaire à la ligne polaire, on a le courant induit positif qui continue à se développer jusqu'à ce que cette portion soit parallèle à la ligne polaire ; en continuant dans la même rotation, c'est le courant induit négatif qui survient et qui a la même di-

rection dans le fil du galvanomètre : quel que soit le sens dans lequel la rotation du fil a lieu, le courant induit, en allant de la ligne axiale à l'équatoriale, sera dirigé comme si l'on fermait le circuit lorsque le fil est parvenu dans cette dernière position, et la direction du courant sera opposée si l'on porte le fil de la ligne équatoriale à la ligne polaire.

Il est à peine nécessaire de remarquer que ces mêmes résultats s'obtiennent avec une spirale cylindrique qu'on fait tourner entre les pôles.

La force magnétique de la terre, comme celle de l'aimant, produit des phénomènes semblables d'induction. Je prends une spirale cylindrique qui contient dans l'intérieur un cylindre de fer doux et qui communique avec le galvanomètre, et je la dispose de manière que son axe soit parallèle à l'aiguille d'inclinaison. En faisant tourner cet axe dans le plan du méridien magnétique d'un angle de 90 degrés, on obtient une certaine déviation qui aura lieu du côté opposé lorsqu'on ramènera la spirale dans la position primitive ; si on fait tourner la spirale de 180 degrés, le courant obtenu aura une intensité double. Nous savons qu'un barreau de fer doux par ces mouvements acquiert à ses extrémités les pôles magnétiques dus à l'induction du magnétisme terrestre, et nous concevons par conséquent la cause des courants induits ainsi obtenus. Mais le magnétisme de la terre peut agir directement par induction sur un circuit métallique, et l'appareil le plus propre à cette expérience consiste en un anneau elliptique de bois *a* et *b* (*fig.* 3) ayant une gorge dans laquelle est enroulé à plusieurs tours un fil de cuivre couvert de soie. Le grand axe de cet anneau autour duquel il tourne, et qui est perpendiculaire au méridien, porte un commutateur *c* semblable à celui de la machine électromagnétique de Clarke, à l'aide duquel

les courants induits pendant une révolution entière de l'anneau entrent dans le galvanomètre avec la même direction. En donnant au plan de la spirale et à son axe de rotation des inclinaisons différentes, on passe de zéro au courant induit le plus fort. M. Palmieri, qui a employé le premier une grande spirale dans un appareil semblable à celui que j'ai décrit, a obtenu de l'induction terrestre un courant capable de la décomposition électrochimique et donnant l'étincelle et des secousses musculaires très-fortes.

Il résulte donc de ces différentes expériences, que toutes les fois que l'action de l'aimant ou d'un circuit voltaïque sur un conducteur filiforme qui fait partie d'un circuit fermé, *augmente de grandeur*, il se développe dans ce conducteur une force électromotrice qui est la cause d'un courant induit de direction contraire à celle du courant inducteur; un courant de la même quantité d'électricité et de sens contraire au premier est induit lorsque la force inductrice *diminue de grandeur.*

Nous devons étudier particulièrement l'action inductrice d'un courant électrique sur la matière même de son propre conducteur. M. Pouillet et M. Nobili ont observé depuis longtemps la grande augmentation de l'étincelle et de la commotion musculaire qui a lieu à l'interruption d'un circuit voltaïque après y avoir inséré une spirale électrodynamique ou mieux un électro-aimant; mais c'est Faraday qui a fait les expériences principales pour prouver que cet effet de la spirale dépend de l'induction.

Après avoir plongé dans du mercure les extrémités d'un circuit voltaïque, nous voyons, en l'ouvrant et en le fermant successivement, une petite étincelle briller au moment seul de l'interruption; si l'on ajoute au circuit d'abord un long fil de cuivre qu'on remplace ensuite par une spi-

rale cylindrique, et enfin par un électro-aimant formé de la même spirale qui entoure un faisceau de fils de fer, nous verrons une étincelle toujours plus grande briller sur le mercure au moment de l'interruption. En tenant avec les mains les deux bouts du circuit, la secousse augmente également, et avec l'électro-aimant elle est violente et très-douloureuse. Notons que l'intensité du courant voltaïque diminue à mesure qu'on augmente la longueur ou la résistance du circuit. On a donc supposé, pour expliquer ces phénomènes, que le courant agit par induction sur la matière même de son conducteur, de sorte qu'il y ait un courant inverse au moment où le circuit est fermé, et un courant direct ou dans le même sens du courant principal à l'instant de l'interruption. Ce second courant, qu'on a appelé aussi *extra-courant*, serait la cause de l'augmentation de l'étincelle et de la secousse musculaire.

Pour démontrer la vérité de cette explication, il fallait prouver directement l'existence des deux courants induits développés au commencement et à la fin du courant principal. Imaginons (*fig.* 4) un circuit voltaïque *abefcd* dont la pile est placée entre *a* et *d* et qui contient en *ef* un électro-aimant : supposons encore que nous ayons entre *b* et *c* un circuit dérivé *s* qui pourra consister ou en une spirale cylindrique, ou dans le liquide d'un voltamètre, ou dans une interruption propre à obtenir l'étincelle.

M. Abria a placé une aiguille d'acier dans la spirale cylindrique du circuit dérivé *s* et a employé une pile assez faible pour que le courant dérivé fût incapable de l'aimanter ; il a trouvé alors qu'en interrompant le circuit en *a* ou en *d*, l'aiguille devenait magnétique et que son magnétisme dénotait le passage d'un courant plus intense et en sens contraire de celui dérivé qui traversait la spirale

pendant que le circuit de la pile était fermé. En prenant le sens de l'aimantation pour reconnaître la direction d'un courant instantané, cette expérience prouve bien le développement de l'extra-courant. En choisissant, pour former le circuit dérivé *s*, un gros fil métallique, il n'y a plus d'étincelle à l'interruption du circuit voltaïque en *a* et en *d*: si l'on fait naître l'interruption en *s*, au moment où l'on ouvre le circuit, c'est en *s* qu'on verra briller l'étincelle. Dans le premier cas, l'extra-courant traverse le circuit dérivé formé du gros fil métallique, et, dans l'autre, il y passe en partie et y produit l'étincelle.

Ces expériences confirment la supposition de deux courants induits dans le circuit voltaïque même ; mais c'est en opérant avec le voltamètre que nous arriverons à la meilleure démonstration de l'existence de ces deux courants. Je mets en *s* un voltamètre, et, à l'aide d'une roue d'interruption placée en *a* ou en *d*, j'ouvre et je ferme le circuit successivement un grand nombre de fois ; je trouve que les gaz développés sur chacun des électrodes formés de fils de platine sont presque égaux en volume et composés principalement de mélange explosif. En plaçant la roue d'interruption entre *b* et *e*, ou entre *c* et *f*, les gaz obtenus sont l'oxygène et l'hydrogène presque purs et à peu près dans le rapport de 1 à 2. Évidemment, dans la première expérience on a recueilli dans le voltamètre les produits du courant dérivé et de l'extra-courant qui a dans le voltamètre une direction opposée à celle du courant voltaïque, ce qui ne peut avoir lieu dans la seconde expérience. Pour prouver l'existence du courant induit négatif, on supprime le circuit dérivé *s* et l'on introduit le voltamètre dans un point quelconque du circuit *abefcd*. S'il n'y a pas d'électro-aimant dans le circuit et si les dents métalliques et

les intervalles isolants de la roue d'interruption ont la même longueur, nous savons que la quantité de mélange gazeux obtenue dans un temps donné est indépendante de la vitesse de rotation et toujours égale à la moitié de celle qu'on aurait obtenue en laissant le circuit fermé. Lorsque l'électro-aimant est introduit dans le circuit, les résultats sont très-différents ; à mesure que la rotation devient plus rapide, les gaz développés vont en diminuant et sont moins purs. Cette diminution est très-grande avec un électro-aimant puissant, et en donnant à la roue d'interruption une vitesse de vingt-cinq à trente rotations par seconde, l'action électrolytique du courant paraît éteinte. Il suffit de supprimer l'électro-aimant, en laissant persister toutes les autres conditions de l'expérience, pour voir reparaître les produits de l'électrolysation de l'eau. Il est impossible d'expliquer ces résultats autrement qu'en les attribuant aux courants induits qui augmentent avec la force de l'électro-aimant et avec la vitesse de rotation de la roue et à la recomposition des mélanges explosifs sous l'action du platine, observée la première fois par M. de la Rive en étudiant les propriétés électrolytiques des courants instantanés et alternativement opposés. Nous verrons que l'effet du courant inverse qui se développe pendant que le circuit est fermé doit être plus grand que celui de l'extra-courant. Je n'abandonnerai pas ce sujet sans rappeler l'application ingénieuse qu'en a faite M. de la Rive à un appareil appelé par lui *condensateur électrochimique*. La partie essentielle de cet appareil est un interrupteur à vibrations introduit depuis dans plusieurs machines électromagnétiques, et spécialement dans celles qui sont destinées à l'usage thérapeutique de l'électricité. Dans le condensateur de M. de la Rive, les extrémités du circuit principal qui

comprend un électro-aimant sont réunies avec deux conducteurs, dont l'un est un fil de cuivre et l'autre un arc du même fil interrompu par un voltamètre. Ainsi le courant voltaïque est transmis entièrement par le premier fil et n'arrive pas à l'eau du voltamètre. Mais au moment où le courant commence à passer, le cylindre de fer doux de l'électro-aimant devenu magnétique attire un morceau de fer soudé convenablement sur le fil de cuivre et le soulève jusqu'à interrompre le circuit. A mesure que, par cette interruption, le courant voltaïque diminue, l'extra-courant se produit et peut circuler dans l'eau du voltamètre et dans la pile en allant dans le même sens du courant principal. Alors le cylindre de fer doux cessant d'être aimanté, laisse tomber de nouveau le fil de cuivre, ce qui produit bientôt les mêmes mouvements. De cette manière le courant d'une couple de Grove, qui est à peine capable de décomposer l'eau, devient plus actif par l'extra-courant qui s'y ajoute; il aurait été curieux de rechercher si à cette nouvelle quantité d'eau décomposée dans le voltamètre correspond une quantité équivalente de zinc oxydé dans la pile.

Avant de passer à l'exposition des différents effets produits par les courants induits, il faut vous décrire les appareils et les méthodes employés pour augmenter la durée et la force de ces courants.

Rien n'est plus facile que d'obtenir une série de courants induits alternativement en sens contraire et aussi longuement que nous voulons. Il n'y a pour cela qu'à insérer une *roue d'interruption* dans le circuit voltaïque. Cette roue *r* (*fig.* 2) est formée d'un disque épais de cristal ou d'ivoire, sur le bord duquel on a fixé à frottement un anneau de cuivre dont une moitié est continue et l'autre coupée de manière à laisser un certain nombre de dents

métalliques séparées entre elles par des intervalles égaux. Deux ressorts isolés entre eux pressent l'un sur la partie continue, l'autre sur la partie interrompue du disque, de sorte qu'en faisant tourner la roue il y a un des ressorts qui touche tantôt la partie métallique, tantôt la partie isolante. Il y aura donc dans le circuit induit un courant inverse à chaque contact métallique, suivi immédiatement par le courant direct au moment de l'interruption.

Il importait beaucoup de pouvoir séparer les deux courants induits, afin d'avoir dans le circuit induit une série de courants de la même direction. C'est, je crois, M. Abria qui le premier a réalisé cette idée en ajoutant une seconde roue d'interruption *r* (*fig.* 7) sur le même axe de rotation. En fixant ces deux roues sur l'axe commun, de manière à pouvoir les faire changer de position indépendamment l'une de l'autre, on obtient facilement ou les seuls courants inverses ou les directs, lorsqu'on fait agir la double roue; pour avoir les premiers, on n'a qu'à faire toucher avec le ressort la dent métallique de la roue appartenant au circuit induit avant que le même contact ait lieu pour la roue du circuit voltaïque, et *vice versâ* pour les courants inverses.

L'appareil le plus propre à obtenir les courants induits les plus forts consiste (*fig.* 2) en deux spirales cylindriques *a* et *c*, destinées, l'une pour le courant voltaïque, et l'autre pour le courant induit; la spirale *c*, qui est pour le courant voltaïque, contient dans son intérieur un faisceau de fils de fer et est enveloppée à l'extérieur par la spirale induite.

Quant au choix des deux spirales, il faut se rappeler les lois générales de la propagation du courant électrique et les appliquer suivant les effets qu'on veut obtenir des cou-

rants induits, c'est-à-dire suivant la résistance du circuit dans lequel ils doivent agir.

Voici quelques expériences faciles à interpréter qui rendent évidente l'application de ces lois. Je prends une bobine composée de six spirales superposées, et dont chacune est formée de la même longueur d'un fil de cuivre couvert de soie et tourné dans le même sens. Si les deux bouts d'une de ces spirales sont réunis aux extrémités d'un galvanomètre, nous savons déjà que des courants induits se développent dans la spirale en introduisant ou en retirant de la bobine un barreau aimanté. Or, je puis disposer les deux bouts des six spirales de deux manières différentes et qui consistent ou à réunir successivement les bouts du même côté de manière à avoir un fil six fois plus épais, ou à unir la fin d'une spirale avec le commencement de la seconde, et ainsi de suite, ce qui fait une spirale six fois plus longue formée de fil simple. Maintenant, j'emploie deux galvanomètres différents pour mesurer les courants induits obtenus en introduisant dans la bobine le barreau aimanté. Un des galvanomètres est formé avec un seul tour d'une lame ou d'un gros fil de cuivre et ne présente presque pas de résistance au courant, et l'autre au contraire est un galvanomètre à fil long. On trouve qu'avec le galvanomètre à fil court, les intensités des courants induits sont proportionnelles au nombre des spirales qui sont réunies avec les bouts homologues, tandis que, avec l'autre galvanomètre, les courants sont à peu près les mêmes, quel que soit le nombre des spirales ainsi réunies. Dans l'autre disposition des spirales, c'est précisément le contraire qui se vérifie : le galvanomètre à un seul tour donne le même courant avec une spirale comme avec les six réunies ensemble, et avec le galvanomètre à fil long,

les courants augmentent avec le nombre des spirales ainsi réunies.

Il faut donc former la spirale induite d'un fil de cuivre plus ou moins épais et d'un nombre de tours réciproquement proportionnels, suivant que le courant induit doit agir sur un corps qui est plus ou moins conducteur; ainsi, pour la secousse musculaire et pour les phénomènes lumineux, on forme la spirale d'un fil mince et d'un grand nombre de tours, tandis que pour l'action électrolytique, pour l'échauffement des fils métalliques et pour l'aimantation, on préfère une spirale d'un fil plus épais et d'un nombre moins grand de tours.

Parmi les effets des courants induits que nous allons examiner, je commencerai par vous montrer les attractions et les répulsions mutuelles que ces courants exercent entre eux ou sur des courants continus, semblables à celles qui constituent la découverte fondamentale d'Ampère.

L'appareil employé dans ces expériences consiste dans une spirale plane *b* (*fig.* 5) fixée à l'extrémité d'un levier horizontal de bois soutenu par un fil d'argent qui est attaché en haut au micromètre de la balance de torsion. Les fils de cette spirale, entortillés autour de la tige, plongent séparément avec leurs extrémités dans du mercure contenu dans deux cavités *d* et *e*. Une autre spirale plane *a* ou le pôle d'un électro-aimant cylindrique est fixé en face et très-près du centre de la spirale mobile. Les courants induits, directs ou inverses, obtenus avec la double roue et avec la bobine d'induction (*fig.* 2), sont transmis dans la spirale mobile *b* en même temps qu'un courant voltaïque continu traverse la spirale fixe *a*. On voit dans un cas la spirale mobile repoussée s'arrêter à une cer-

taine distance, et dans l'autre la même spirale attirée et retenue en contact de la spirale fixe.

M. Lallemand a trouvé que la force de torsion nécessaire pour ramener la spirale mobile à sa position d'équilibre était la même dans les deux cas, et qu'en faisant passer dans la spirale mobile les deux courants induits alternativement de signe contraire, l'action d'un courant continu qui traverse la spirale fixe est nulle. Les deux courants induits sont donc formés d'une quantité égale d'électricité.

En réunissant avec un fil métallique les deux cavités *d* et *e* (*fig.* 5), où sont plongées les extrémités de la spirale mobile *b*, on peut obtenir ces mêmes actions en faisant passer dans la spirale fixe un courant voltaïque alternativement arrêté et transmis par la roue d'interruption. M. Lallemand a trouvé que, dans ce cas, l'action répulsive ou celle exercée par le courant inducteur sur les courants inverses est plus forte. Ce même résultat a été obtenu en faisant passer dans la spirale mobile, tantôt les seuls courants inverses et tantôt les directs, et dans la spirale fixe le courant voltaïque interrompu : les forces de torsion qui mesurent les deux effets de répulsion et d'attraction sont inégales et correspondent à la différence trouvée précédemment. Nous verrons, à la fin de cette leçon, comment on parvient à interpréter ces résultats. Il n'est pas sans intérêt de vous montrer que ces mêmes mouvements d'attraction et de répulsion, dus aux actions réciproques développées entre les courants inducteurs et les induits, peuvent s'obtenir en substituant à la spirale mobile un disque de cuivre ou d'un métal quelconque. Lorsqu'on ferme le circuit, on voit ce disque vivement repoussé du pôle de l'électro-aimant et ensuite attiré au moment de

l'interruption. Il est facile de vous démontrer que des courants induits instantanés se développent dans le disque métallique comme dans la spirale fermée. On pratique pour cela une incision suivant un rayon du disque, et on soude les extrémités du galvanomètre aux deux bords de l'incision. On voit alors apparaître les signes des courants induits au moment où l'action de l'électro-aimant commence ou cesse, comme on les obtient avec la spirale ; on peut augmenter l'intensité de ces courants en enlevant une grande partie du disque et en le réduisant ainsi à un simple anneau extérieur.

C'est surtout dans les masses métalliques suspendues entre les pôles d'un électro-aimant qu'ont lieu des mouvements brusques et violents produits par les réactions électrodynamiques entre les courants inducteurs et les induits. Pour expliquer ces mouvements, il n'y a qu'à considérer la direction des courants induits développés dans une spirale ou dans une masse métallique quelconque lorsqu'elle se rapproche ou s'éloigne du pôle d'un électro-aimant ; les actions électrodynamiques qui se produisent tendent constamment à détruire ces mouvements. Je choisirai parmi un grand nombre d'expériences celle qui me paraît la plus propre à faire mieux analyser la cause de ces phénomènes. Voici un cube (*fig.* 13) formé de plusieurs lames très-minces de cuivre, isolées entre elles par une couche de vernis. Je suspends ce cube *b* à un fil de cocon entre les pôles *p* et *q* (*fig.* 20) d'un grand électro-aimant de manière que les lames soient horizontales. En fermant le circuit, le cube, qu'il soit en repos ou en mouvement, ne paraît pas ressentir l'action de l'aimant. Les courants induits ne pouvant se développer et circuler que dans un plan normal à la ligne polaire, il est clair que ces courants ne

pourrait se [illegible] remarquables, lorsque les [illegible] mouvement. Le phénomène [illegible] vertu [illegible] le cube [illegible] est celui dans lequel les [illegible] parallèles à la ligne polaire. Dans [illegible] le cube repousse de pôles [illegible] et s'arrête brusquement [illegible] et les faces et la ligne polaire [illegible] le cube se [illegible] et les faces des pôles. Ces phénomènes sont encore plus remarquables lorsque le cube [illegible] suspendu entre les pôles est animé d'un mouvement de rotation au moment où le courant est fermé : le cube s'arrête brusquement [illegible] d'une grande vitesse de rotation, et c'est en vain le courant qu'on le voit reprendre son mouvement et rebrousser chemin. Il est curieux de voir ces mêmes phénomènes reproduits sur de grandes masses de [illegible] suspendues à un fil de soie et qu'on fait tourner rapidement. Il est certainement digne de remarque que la force de torsion du fil puisse être paralysée par l'action des courants induits qui cessent de se développer quand la masse métallique est en repos. Mais n'oublions pas que la rotation [illegible] aimant fixe et les courants induits développés dans une masse métallique, par sa rotation, tend toujours à l'arrêter et que ces courants acquièrent d'autant plus promptement leur plus grande intensité qu'ils se produisent dans une masse métallique douée d'un grand pouvoir conducteur. Au moment de l'interruption du courant, cette même rotation pousse la masse métallique vers les pôles, et il peut arriver, à cause du temps employé par l'aimant temporaire à se désaimanter,

que son effet se prolonge et oblige cette masse à faire plusieurs révolutions. De là les brusques vibrations et les mouvements révulsifs qui se produisent dans les lames ou dans les fils de cuivre suspendus entre les pôles d'un électro-aimant au moment de l'interruption du circuit. En composant ces masses métalliques d'un grand nombre de lames isolées entre elles, on donne à ces mouvements une plus grande intensité, tandis qu'en coupant ces lames en des sens différents, on parvient à détruire ces mouvements.

Parlons maintenant des effets chimiques des courants induits. C'est avec l'appareil d'induction déjà décrit (*fig.* 2) qu'on peut étudier ces effets, après avoir ajouté un voltamètre *v* au circuit de la spirale induite. En faisant passer dans le voltamètre les deux courants induits qu'on obtient en tournant la roue d'interruption du circuit voltaïque et en recueillant séparément les gaz qui se développent sur chacune des électrodes, on trouve que ces gaz sont des mélanges explosifs. Il est utile dans ces expériences d'avoir fixé d'avance dans les cloches qu'on emploie pour recueillir les gaz, deux fils de platine, à travers lesquels on fait passer l'étincelle électrique tout à fait comme dans un eudiomètre. En faisant circuler dans le voltamètre, à l'aide de la seconde roue, une série de courants directs ou inverses, on n'a plus que des gaz purs séparés sur chacun des électrodes et à peu près dans le rapport connu de la composition de l'eau. Ces résultats nous prouvent de nouveau et d'une manière incontestable, que les deux courants induits au commencement et à la fin d'un courant électrique, sont formés d'une quantité égale d'électricité.

Toutes les fois qu'on fait passer les deux courants induits, inverse et direct, dans le voltamètre, on trouve

que les quantités de mélange gazeux obtenues dans les deux cloches sont loin d'être égales et que le plus grand dégagement a lieu tantôt sur une électrode, tantôt sur l'autre. On ne doit pas être étonné de ce résultat si l'on se rappelle les phénomènes d'oxydation et de désoxydation des électrodes de platine et la recomposition des gaz de l'eau, que M. de la Rive a découverts en étudiant l'action électrolytique des courants induits alternativement de signe contraire. Ce qu'il importe principalement d'établir, c'est que les gaz développés sur les deux électrodes, restent dans tous les cas et malgré la différence de leur volume, des mélanges explosifs purs.

Le résultat qu'on obtient en substituant à l'eau acidulée du voltamètre une solution saturée de sulfate de cuivre, ne laisse aucun doute sur l'égalité des deux courants induits. En tournant plus ou moins rapidement la roue d'interruption du circuit voltaïque, et en faisant ainsi arriver dans cette solution des millions de courants induits qui s'y succèdent alternativement en sens contraire, on n'obtient jamais le moindre indice d'électrolysation. Il n'y a qu'à introduire la seconde roue dans le circuit induit et à faire ainsi circuler dans le liquide tantôt les courants inverses, tantôt les directs, pour voir apparaître, après le passage de quelques dents seulement, une couche de cuivre qui se dépose tantôt sur une électrode, tantôt sur l'autre.

Il était important d'étudier l'influence de la vitesse de rotation de la roue du circuit inducteur sur les quantités des produits chimiques des courants induits; malheureusement ces expériences sont difficiles parce qu'on ne peut pas obtenir des contacts parfaits lorsque la vitesse de rotation des roues est grande, et parce que les gaz se recom-

posent sur les électrodes de platine. Voici néanmoins les nombres que j'ai obtenus avec trois vitesses différentes de rotation. Ayant ouvert et fermé alternativement le circuit cinq fois dans une seconde, j'ai obtenu $1^{cc},20$ de mélange gazeux en dix minutes; avec des vitesses dix fois et vingt fois plus grandes, les mélanges obtenus ont été $3^{cc},60$ et $6^{cc},80$. Ces quantités ont donc augmenté proportionnellement aux vitesses de rotation ou au nombre des courants induits développés dans un temps donné; mais il est possible qu'avec des vitesses plus grandes ce résultat cesse d'avoir lieu.

Jusqu'ici les propriétés étudiées dans les courants induits nous ont prouvé que les deux courants inverse et direct sont égaux : en passant aux effets physiologiques et d'aimantation, on pouvait s'attendre à trouver entre eux des différences. Rappelons-nous que de petites étincelles de la machine électrique sont capables de produire des effets très-forts d'aimantation et de contraction musculaire, ce qui nous prouve que ces phénomènes dépendent principalement de la vitesse avec laquelle les deux électricités se neutralisent. Or, cette vitesse, toujours très-grande dans les courants induits qui n'ont qu'une très-courte durée, ce qui explique bien leur puissance à aimanter et à exciter des contractions, pouvait être différente pour les deux courants induits, à cause du temps probablement inégal qui est nécessaire pour que le courant voltaïque atteigne son état d'équilibre et pour qu'il cesse entièrement. Les belles recherches de M. Henry, de Princetown, ont effectivement démontré que la secousse due au courant induit négatif était à peine sensible, tandis qu'au moment de l'interruption cette secousse devenait très-forte. En augmentant le nombre des couples de la pile ou

en diminuant la résistance du circuit inducteur, le physicien américain est parvenu à augmenter la secousse obtenue par le courant négatif et à la rendre égale à celle qu'on a lorsque l'action inductrice cesse.

Avec des appareils d'induction formés de deux spirales d'un gros fil de cuivre, on obtient des deux courants induits une aimantation dont le sens indique une plus grande intensité pour les courants directs. Pour vérifier la différence de ces deux courants on réunit les deux extrémités de la spirale induite à une petite spirale cylindrique dans laquelle on introduit une aiguille d'acier, ou mieux, un cylindre de fer doux. En faisant tourner la roue d'interruption du circuit inducteur avec une vitesse uniforme et en fermant après le circuit induit, on trouve le cylindre de fer doux aimanté dans le sens des courants directs. Lorsqu'on opère avec un courant voltaïque très-fort et que la rotation est très-rapide, l'étincelle du circuit inducteur rend certainement la période de l'interruption plus longue, et alors l'aiguille ou le fer doux prennent l'aimantation due aux courants inverses. On peut obtenir sur l'aiguille même du galvanomètre, comme l'a vu premièrement M. Abria, un phénomène semblable à celui que nous venons d'étudier. Si pendant la rotation de la roue du circuit inducteur, on ferme le circuit de la spirale induite dans laquelle est inséré le galvanomètre, il est rare de voir l'aiguille rester à zéro; pour cela il faut que le système soit parfaitement à zéro, que la roue tourne très-rapidement et que les aiguilles soient d'acier très-dur. Mais si le système est un peu dévié d'un côté ou de l'autre du zéro, au commencement de l'expérience, la déviation continue dans le même sens et on peut la renverser en amenant le système un tant soit peu du côté op-

posé. Évidemment, dans ces différentes expériences, comme M. Poggendorff l'a fait remarquer, la spirale galvanométrique agit en aimantant les aiguilles qui sont plus ou moins inclinées avec l'axe de la spirale, et, en effet, une aiguille de fer doux, substituée aux aiguilles magnétiques du galvanomètre, présente encore mieux ces mêmes phénomènes. D'accord avec les résultats précédents, c'est le courant induit direct qui agit pour aimanter temporairement les aiguilles du galvanomètre. En admettant que l'aimantation plus forte doive appartenir au courant dont la durée est la plus courte et acquière ainsi dans l'unité de temps une plus grande intensité, on peut attribuer ces différences à la variation inégale du commencement et de la fin du courant inducteur. Cette variation doit dépendre de l'état des extrémités qui servent à interrompre ou à fermer le circuit voltaïque, et l'on peut aussi concevoir qu'elle soit modifiée par la force de la pile.

Passons aux effets lumineux et calorifiques des courants induits. Avec la double roue d'interruption il est facile d'obtenir une étincelle très-brillante, due à la série des courants induits directs. Il faut pour cela placer la roue du circuit induit de manière que l'interruption ait lieu après celle du circuit inducteur ; on verra alors l'étincelle du courant direct briller d'un éclat d'autant plus vif, que la rotation sera plus rapide. En tournant lentement la double roue, on est frappé de voir cette étincelle encore très-distincte, lorsque l'intervalle de temps entre l'interruption des deux circuits est prolongé d'un tiers à une demi-seconde. Si le circuit induit est fermé avant l'inducteur, comme cela doit être pour obtenir les courants inverses, on voit distinctement l'étincelle de ce courant lorsque la rotation est rapide : nous verrons ensuite que

ces phénomènes sont dus principalement au temps employé par le fer de l'électro-aimant à prendre ou à perdre le magnétisme.

C'est à M. Masson et à M. Breguet, qui ont employé les premiers des spirales formées avec des fils de cuivre très-longs et très-épais, que nous devons les expériences les plus frappantes sur la lumière électrique des courants induits. M. Ruhmkorff a substitué à la double roue un *interrupteur à vibrations*, semblable à celui imaginé par M. de la Rive, et, en remplaçant le cylindre de fer doux par un faisceau de fils de fer, il a réussi à construire un appareil d'induction très-puissant et d'un prix modéré; il a ainsi mis tout le monde dans le cas de répéter une des plus belles et, jusqu'ici, une des plus inexplicables expériences sur la lumière électrique qui consiste dans des apparences lumineuses très-différentes aux deux pôles. On voit à l'aide de cet appareil, qui fonctionne avec quelques éléments de Grove, des flots étincelants de lumière électrique se renouveler sans cesse avec une grande rapidité et traverser l'espace raréfié de *l'œuf philosophique*, d'une extrémité à l'autre de la spirale induite à la distance de plusieurs centimètres. C'est encore au moment de l'interruption du circuit que ces phénomènes lumineux apparaissent avec toute leur intensité.

Si nous fixions sur les extrémités de cette spirale deux lames d'or rapprochées comme celles des électroscopes, nous verrions ces lames s'attirer toutes les fois que le circuit voltaïque est fermé ou ouvert, et beaucoup plus vivement dans le second cas.

Je ne m'arrêterai pas longuement sur les effets calorifiques des courants induits. La manière la plus simple d'étudier ces effets consiste à entourer la soudure d'un

couple thermo-électrique d'antimoine et de bismuth avec une spirale de fil de platine très-mince qui fait partie de la spirale induite ; une couche de vernis est appliquée sur la soudure et empêche ainsi tout contact métallique avec la spirale. On ferme le circuit du couple thermo-électrique avec un bon galvanomètre à fil court, immédiatement après avoir fait un certain nombre de tours avec la roue d'interruption qui est dans le circuit voltaïque ; on a alors un courant thermo-électrique dû à la chaleur communiquée à la soudure par le fil de platine. Si l'on fait passer séparément un certain nombre de courants induits inverses et ensuite le même nombre de courants directs, on trouve constamment un effet plus grand dans le second cas que dans le premier.

A l'aide de deux bobines formées chacune de deux spirales de même dimension, on peut disposer les extrémités des deux circuits induits de manière à faire entrer les deux courants dans la spirale de platine ou dans le même sens ou dans le sens contraire. Il faut pour cela qu'une roue d'interruption soit insérée dans les deux spirales inductrices réunies, et une roue séparée pour chacune des spirales induites. On dispose ces roues de manière à avoir ou les seuls courants inverses ou les seuls courants directs. Dans l'un ou dans l'autre cas, si les deux courants induits traversent dans le même sens la spirale de platine, l'effet calorifique, mesuré par le courant thermo-électrique, est beaucoup plus grand que la somme des effets que les deux courants produisent séparément. Ainsi donc, les courants induits, malgré leur très-courte durée, se comportent, quant au développement de la chaleur, comme les courants continus. Lorsque, au contraire, les extrémités de deux circuits induits communiquent avec

celles de la spirale de platine, comme si leurs courants devaient la traverser en sens contraire, le résultat est tout à fait nul et resterait ainsi quand même l'expérience serait prolongée fort longtemps. Nous ne croyons pas nécessaire d'insister longuement sur l'interprétation de cette expérience, dont le résultat est le même pour toutes les propriétés des courants électriques. Quelle que soit l'hypothèse par laquelle on se représente un courant, on ne peut concevoir la propagation du mouvement électrique entre deux points d'un circuit qui sont dans le même temps soumis à des forces électriques égales et de signe contraire.

J'ai enfin à vous parler de la propriété très-remarquable qu'ont les courants induits de développer des courants induits secondaires. Reprenons l'appareil (*fig.* 1) des spirales planes qui a été employé pour vous montrer l'expérience fondamentale de l'induction, et réunissons les deux bouts de la seconde spirale *b* à ceux de la troisième spirale *c*, à proximité de laquelle il faut placer la quatrième spirale *d*. En réunissant cette spirale *d* à une autre *e*, je puis mettre une sixième spirale *f* en présence de celle-ci. Lorsque nous ferons passer un courant voltaïque dans la première spirale *a*, le courant induit développé dans la spirale *b* et qui traverse la spirale *c*, agit par induction sur la spirale *d* et développe dans celle-ci des courants qui deviennent à leur tour inducteurs sur la spirale *f*, et ainsi de suite. En employant un courant voltaïque assez fort, on peut faire agir plusieurs couples de ces spirales. Les effets principaux de ces courants sont les étincelles, l'aimantation et les secousses musculaires. M. Henry est le physicien qui a découvert et étudié le premier la propriété inductrice des courants induits ; il a ap-

pelé courant de *premier ordre* le courant voltaïque ou l'inducteur, courant de *deuxième ordre* le courant induit dans la seconde spirale, courant de *troisième ordre* le courant induit par celui-ci, et ainsi de suite. Il aurait été préférable, au lieu de comprendre sous cette dénomination le courant voltaïque, de dire simplement courant induit de premier, de second, de troisième ordre, etc., etc.

La première recherche à faire sur les courants induits des ordres supérieurs était celle de leur direction ; en supposant que les courants induits agissent par induction comme les courants voltaïques, on pouvait s'attendre à trouver pour chacun d'eux, deux courants induits de sens contraire, correspondant au commencement et à la fin de leur existence, quelque courte qu'elle soit.

Si nous avons un galvanomètre inséré dans le circuit induit de troisième ordre, nous n'obtiendrions aucun mouvement dans l'aiguille, en faisant tourner la double roue d'interruption de manière à obtenir une série de courants induits directs ou inverses de deuxième ordre ; ce résultat est bien d'accord avec la déduction que nous venons de tirer de la nature des courants induits des ordres supérieurs, et de l'analogie qu'on a admise entre l'action inductrice des courants voltaïques et celle des courants induits.

En se rappelant que la propriété d'aimanter et celle d'exciter des secousses musculaires dépendent principalement de la vitesse des décharges électriques, on ne doit pas être étonné si l'on trouve les courants induits des ordres supérieurs fortement doués de ces propriétés.

M. Henry a tâché de déterminer la direction de ces courants par l'aimantation. Les résultats constants qu'il a obtenus et qu'il est facile de vérifier, prouvent qu'à partir du

courant induit du second ordre, inverse ou direct, les courants des ordres supérieurs produisent alternativement des aimantations de signe contraire, et correspondent, par conséquent, à l'effet inducteur du courant voltaïque qui commence.

Nous avons déjà remarqué que l'aimantation, produite par une série de courants induits alternativement de direction opposée, pouvait dépendre de l'intensité inégale de ces courants : suivant cette hypothèse, il en résulterait que l'action inductrice d'un courant induit est toujours plus forte à son commencement qu'à sa fin.

Mais il importait de démontrer par l'expérience qu'un courant induit du second ordre excite deux courants du troisième ordre, formés de quantités égales d'électricité et ayant une direction opposée.

Nous devons à M. Verdet la première expérience qui a été faite dans ce but ; elle consiste à recueillir séparément les gaz produits sur chaque électrode par l'action électrolytique des courants induits du troisième ordre. Ces courants étaient développés par une série de courants induits négatifs ou positifs de deuxième ordre, ou par tous les deux à la fois. Les gaz developpés sur chacune des électrodes étaient des mélanges explosifs purs, ce qui prouve que chaque courant induit du deuxième ordre développe deux courants égaux du troisième ordre de direction opposée. J'ai confirmé ce résultat en m'assurant que des courants du troisième ordre, capables de décomposer l'eau, et de développer sur chacune des électrodes des mélanges explosifs, ne produisaient aucune décomposition sensible dans la solution du sulfate de cuivre.

Une expérience de M. Lallemand conduit à la même conclusion. En faisant passer dans la spirale mobile (*fig.* 5)

une série de courants du troisième ordre, ce physicien a trouvé que l'action d'un courant continu, transmis dans la spirale fixe, était nulle sur ces courants.

Maintenant que nous connaissons les propriétés de courants induits des ordres supérieurs, nous pouvons comprendre l'action réciproque de ces courants et celle des lames métalliques interposées entre les circuits inducteurs et les induits.

Nous savons déjà qu'en faisant agir une roue d'interruption dans un circuit voltaïque qui comprend un électro-aimant, on a une série d'étincelles très-brillantes; nous avons aussi étudié les propriétés de l'extra-courant ou du courant induit direct, qui est développé à la cessation du courant voltaïque et qui est la cause de ces étincelles. Si nous fermons le circuit d'une seconde spirale qui entoure la spirale inductrice, nous verrons cesser presque entièrement les étincelles de l'extra-courant. En ayant une seconde roue insérée dans la spirale induite, de manière à obtenir l'étincelle du courant direct, nous obtiendrons la même diminution dans l'étincelle de l'extra-courant. Si on enveloppe la spirale avec un cylindre métallique continu, l'effet produit sur l'extra-courant sera le même que celui de la spirale induite fermée. Il est donc prouvé que la diminution de l'étincelle dépend de la réaction exercée sur le circuit voltaïque par le courant induit direct, qui est développé ou dans la seconde spirale ou dans le cylindre métallique. Avec une seconde spirale réunie à la spirale inductrice, on peut facilement faire varier la grandeur de l'étincelle de l'extra-courant, et démontrer ainsi que, quand elle augmente, l'étincelle induite diminue, et *vice versâ*. Il faut pour cela introduire ou enlever un faisceau de fils de fer dans la spirale ajoutée

au circuit inducteur. Dans le premier cas, l'étincelle de l'extra-courant augmente notablement, et l'étincelle induite devient très-faible. Si le faisceau de fils de fer est introduit dans la bobine formée de deux spirales, l'inductrice et l'induite, l'étincelle de l'extra-courant diminue, et celle de l'induit prend un grand développement. Parmi les exemples de la réaction de deux courants induits développés en même temps sur le circuit voltaïque et sur l'induit, on peut citer encore le moyen employé par M. Fizeau pour augmenter l'étincelle du courant induit direct dans l'appareil de M. Ruhmkorff. En réunissant convenablement les deux extrémités d'une interruption pratiquée dans la spirale inductrice avec les deux lames métalliques d'un condensateur, on obtient une grande diminution dans l'étincelle de l'extra-courant et une augmentation correspondante dans celle du courant induit.

Pour tâcher de comprendre les effets de cette réaction entre les circuits inducteurs et les induits, nous devons avoir recours à la propriété inductrice des courants induits du second ordre. En effet chacun de ces courants, que nous savons se développer également dans le circuit extérieur comme dans le circuit même de la pile, donne lieu à deux courants induits de troisième ordre séparés entre eux par un intervalle de temps infiniment court, formés de la même quantité d'électricité et de sens contraire mais ayant une intensité différente; les courants inverses de troisième ordre qui sont les premiers à se développer et les plus intenses, tendent donc à s'opposer réciproquement au développement de leurs courants inducteurs. Puisque le circuit induit est fermé et continue à l'être pendant la durée de l'étincelle qui accompagne

l'interruption du circuit voltaïque, il faut que l'influence de l'extra-courant, pour diminuer le courant induit direct, soit plus faible que l'influence de ce dernier sur l'extra-courant; ce qui ne se vérifie pas pour les courants inverses développés dans le circuit induit et dans celui de la pile, et ce qui nous explique en partie la plus grande intensité trouvée dans les courants directs.

En étudiant la réaction du circuit induit sur l'inducteur, on trouve des effets remarquables dans la quantité des produits électrolytiques du courant voltaïque. Rappelons-nous que ces produits diminuent notablement, si l'on a dans le circuit un électro-aimant qui rend très-forts les courants induits développés dans le circuit même; il faut attribuer cette diminution à l'action des courants induits inverses sur le courant voltaïque, qui ne peut être neutralisée par celle des courants directs qui se produisent pendant l'interruption du circuit inducteur. Si par la réaction du circuit induit sur l'inducteur, les effets de l'induction du courant voltaïque sur son propre conducteur, viennent à s'affaiblir, nous devons nous attendre à trouver alors une augmentation dans les produits de l'électrolysation de ce courant. C'est en effet ce qu'on trouve avec l'appareil qui a été plusieurs fois décrit, formé (*fig.* 2) de deux spirales dont l'une communique avec la pile, le voltamètre et la roue d'interruption. Je ne citerai ici qu'une seule expérience dans laquelle j'obtenais en 60 secondes 19^{cc},5 de mélange gazeux avec un courant voltaïque interrompu; en insérant dans le circuit de ce courant une spirale formée d'un gros fil de cuivre et contenant un faisceau de fils de fer, ces produits n'ont plus été que 6^{cc},50, et en fermant la spirale induite, ils sont devenus 15^{cc}.

Des résultats analogues et encore plus frappants s'obtiennent en faisant réagir deux courants voltaïques transmis par deux spirales semblables, interrompus par deux roues distinctes : on peut ainsi recueillir dans chaque voltamètre les produits de ces courants et en même temps voir les étincelles qui se produisent pendant leur interruption. En ayant soin de placer les dents de deux roues de manière que les interruptions et les contacts aient lieu autant que possible dans le même instant, voici les résultats auxquels on arrive : si les deux courants voltaïques qui induisent l'un sur l'autre ont la même direction, les étincelles sont le plus brillantes possible, et les produits électrolytiques de chacun des deux courants sont beaucoup moindres que ceux qu'on a en faisant passer séparément l'un ou l'autre de ces courants ; si leur direction est contraire, les étincelles sont très-petites et à peine visibles, et les produits gazeux sont à peu près doubles pour chaque courant.

En employant deux appareils d'induction qui malheureusement n'avaient pas la même puissance, et trois roues d'interruption, l'une servant pour le circuit voltaïque, qui était le même pour les deux appareils, et une roue distincte pour chacune des spirales induites, j'ai pu obtenir deux séries de courants directs ou inverses, que je faisais agir mutuellement en les obligeant à circuler ou dans le même sens ou en sens contraire, dans les deux spirales d'une grosse bobine. Les quantités des gaz recueillis dans les deux voltamètres des circuits induits n'ont montré de différence, quelle que fût la direction des deux courants induits.

J'ai encore étudié la réaction des courants induits du troisième ordre sur les courants induits du second ordre.

J'emploie pour cela les doubles spirales des deux grandes bobines déjà décrites. Une des spirales est pour le courant voltaïque; l'autre, réunie à la spirale de la seconde bobine, est destinée au courant induit du second ordre, et la quatrième spirale est pour les courants du troisième ordre. J'ai un voltamètre dans chacun des circuits induits et une roue d'interruption dans le circuit voltaïque. Si la quatrième spirale est fermée, on voit diminuer l'étincelle de l'extra-courant, et les produits électrolytiques des courants induits de second ordre augmenter notablement. Il aurait été très-important de pouvoir déterminer avec exactitude les quantités de gaz développés en même temps par les circuits induits de deuxième et de troisième ordre; mais on connaît les difficultés qu'on rencontre dans ces expériences à cause de la recomposition des deux gaz sur les électrodes. Dans deux expériences faites avec le procédé que j'ai décrit, la spirale induite secondaire ayant une résistance double de celle de la spirale des courants de troisième ordre, j'ai trouvé que les quantités de mélange gazeux obtenues dans le voltamètre de la première étaient à celle de l'autre à peu près : : 3 : 1.

Étudions maintenant l'influence d'une lame métallique ou d'une spirale fermée qu'on interpose entre le circuit voltaïque et l'induit. M. Henry et M. Dove ont les premiers découvert cette influence, qui consiste à diminuer la secousse musculaire, l'aimantation et l'étincelle produites par les courants induits, sans faire varier la déviation galvanométrique. M. Henry a démontré, par une expérience que je vous ai déjà décrite, que des courants induits se développent dans les lames métalliques ainsi soumises à l'induction, et que leurs effets cessent par conséquent si elles sont coupées de manière à interrompre ces courants.

En interposant un cylindre formé avec une lame métallique entre les deux spirales d'un appareil d'induction, je n'ai pas trouvé de différence dans les effets électrolytiques des courants induits.

Il serait difficile de pouvoir donner une analyse rigoureuse et l'explication des différents phénomènes que je vous ai exposé et qui démontrent l'action réciproque des courants induits. Bornons-nous à rappeler que les courants induits de troisième ordre, développés par l'action inductrice des courants induits de second ordre, sont constitués de quantités égales d'électricité qui circulent en sens contraire pendant des temps très-courts et qui se succèdent à des intervalles très-rapprochés. Rappelons encore que les courants de troisième ordre développés par le commencement de l'action inductrice ont une intensité plus grande que ceux produits par sa cessation. Imaginons maintenant deux circuits, chacun desquels est parcouru par deux courants induits de deuxième ordre ayant la même direction, comme il arrive lorsqu'on a une lame métallique ou une spirale fermée placée entre les deux spirales d'un appareil d'induction : si ces deux circuits sont voisins, il y aura à la suite du courant inducteur, deux courants de troisième ordre qui se succèderont en sens contraire et à un intervalle de temps infiniment court. De cette manière on peut concevoir l'affaiblissement des propriétés lumineuses et magnétiques et des secousses excitées par les courants induits, sans qu'il y ait de variation dans leurs produits électrolytiques et dans les déviations du galvanomètre, car ces effets expriment la somme des quantités totales de l'électricité qui composent ces courants.

Je n'ai plus, pour achever cette exposition peut-être

trop longue et minutieuse des propriétés des courants induits, qu'à vous montrer que la décharge de la bouteille, malgré sa durée très-courte, peut développer une décharge induite qui devient à son tour capable d'exciter des courants induits des ordres supérieurs.

Reprenons encore l'appareil (*fig.* 1) déjà employé pour étudier les courants induits des ordres supérieurs, en ayant soin de nous assurer d'avance par une décharge qu'on fait passer dans l'obscurité, que le fil de chaque spirale est bien isolé dans toute sa longueur. Disposons une interruption dans les fils qui réunissent les spirales *b* et *c*, *d* et *e*, etc., ou introduisons dans ces fils une petite spirale cylindrique placée normalement au méridien magnétique et contenant une aiguille d'acier. Si nous faisons passer dans la spirale *a* la décharge d'une bouteille de Leyde, nous verrons une étincelle briller à chacune des interruptions des spirales induites, et nous trouverons toutes les aiguilles aimantées. Une lame métallique ou une spirale fermée, placée entre la spirale inductrice et l'induite, se comporte, comme avec les courants induits, en faisant diminuer notablement l'étincelle, l'aimantation et les secousses produites par la décharge secondaire. Ces mêmes effets se produisent en mettant la lame entre les couples des spirales destinées à obtenir les décharges induites des ordres supérieurs.

M. Henry et M. Marianini, qui ont fait un grand nombre de recherches avec le procédé de l'aimantation sur les décharges induites, ont trouvé qu'en employant une petite bouteille de Leyde faiblement chargée, ou en tenant les spirales à une grande distance, ou en obligeant la décharge inductrice à traverser un liquide mauvais conducteur, la décharge secondaire avait une direction op-

posée à celle de la bouteille : en diminuant la distance des spirales ou la résistance du circuit inducteur, ou en augmentant la tension de la charge, le sens de la décharge secondaire devient le même que celui de la décharge de la bouteille. Les expériences de M. Marianini, dont j'ai vérifié l'exactitude, établissent incontestablement ce renversement de la direction de la décharge secondaire et déterminent la distance entre les deux spirales à laquelle l'aiguille mise dans le circuit secondaire n'est plus aimantée.

Quant aux décharges induites des ordres supérieurs, M. Henry a trouvé, en opérant toujours avec la méthode de l'aimantation, que leurs directions étaient les mêmes que celles trouvées pour les courants induits.

Tous ces résultats n'ayant été déduits qu'en employant la méthode de l'aimantation pour juger de l'intensité et de la direction des courants induits, ils exigeaient d'autres vérifications. En effet, nous avons déjà reconnu que des courants induits étaient capables d'exciter une très-forte aimantation, lorsque l'action électrolytique et le galvanomètre faisaient voir qu'ils étaient formés de deux courants de quantités égales d'électricité et de sens contraire. D'un autre côté, les doutes sur les indications données par l'aimantation étaient justifiés par les expériences très-connues de Savary. De là donc tant de recherches tentées par un si grand nombre de physiciens pour déterminer le sens des décharges secondaires, et pour décider si ces décharges sont vraiment un mouvement unique d'électricité dans un sens donné, ou bien une succession de décharges en nombre pair de directions opposées.

Je tâcherai d'examiner rapidement ces différentes recherches et de discuter les résultats obtenus, afin que nous

puissions arriver à quelque conclusion satisfaisante. Remarquons d'abord qu'on s'est trop empressé de croire à l'incertitude des résultats obtenus avec la méthode de l'aimantation. M. Marianini, qui a fait aussi de très-belles expériences sur l'aimantation produite par la décharge, est arrivé à la conclusion, que le sens de l'aimantation indique exactement le sens de la décharge, comme si c'était un courant voltaïque, à la condition que l'aiguille n'ait jamais été précédemment aimantée.

On peut donc considérer les résultats de M. Henry et de M. Marianini sur la direction des décharges induites, comme aussi exactes que ceux obtenus en opérant sur les courants induits et en tirer les mêmes conséquences (1).

J'ai fait dans le temps des expériences sur la décharge induite, en employant, pour la mesurer, un galvanomètre ordinaire. Au moment de la décharge dans la spirale inductrice *a* (*fig.* 1), l'aiguille du galvanomètre réunie à la spirale *b* est déviée, et en répétant une série d'autres décharges, quoique plus petites, la déviation augmente. En faisant passer la décharge en sens contraire, la déviation de l'aiguille a lieu du côté opposé. J'ai répété dernièrement ces expériences avec les mêmes résultats. Je pense que l'aiguille du galvanomètre se comporte sous la décharge induite secondaire, comme nous l'avons déjà vu faire sous l'action alternative de deux courants induits, inverse et direct, du deuxième ordre. L'aimantation, comme

(1) Je suis autorisé à déclarer que c'est par une erreur constante commise sur le sens de la spirale cylindrique employée pour aimanter l'aiguille, qu'il est dit dans une Note de M. Felici, insérée dans le cahier d'octobre 1853 des *Annales de Chimie et de Physique*, que la direction de la décharge induite est l'inverse de celle de la bouteille de Leyde, tandis qu'il fallait dire qu'elle est toujours dirigée dans le même sens.

la déviation galvanométrique, indiquent que la direction de la décharge induite secondaire est la même que celle de la bouteille.

On a encore tenté d'autres méthodes. M. Riess prend une lame de métal recouverte d'une couche de résine sur ses deux faces ; les deux extrémités de la spirale induite aboutissent à deux pointes métalliques qui sont en contact avec les couches de résine. Une fois que l'étincelle induite a éclaté, la direction de la décharge est connue en projetant successivement sur la surface résineuse le mélange de soufre et de minium pulvérisé, qui sert à produire les figures de Leichtenberg. On sait déjà qu'en projetant ces poudres sur une lame de résine qui a été parcourue par la décharge de la bouteille de Leyde, les figures formées par les groupes de leurs particules sont différentes sur les deux espaces mises en contact des extrémités entre lesquelles la décharge a eu lieu ; constamment la trace de l'électricité positive est dessinée par des filaments et des ramifications jaunes, et la négative par des cercles rouges. M. Riess avait d'abord conclu d'un grand nombre d'expériences que la décharge induite est le plus souvent représentée par un mouvement d'électricité dans le même sens que la décharge inductrice. Ayant repris plus tard les mêmes recherches, il a reconnu qu'on ne pouvait assigner à la décharge secondaire une direction unique.

J'ai employé une autre méthode qui consiste à faire passer la décharge induite entre deux pointes métalliques, séparées par une feuille de papier, en me fondant, pour juger de la direction, sur une ancienne expérience de Lullin, de Genève. Je me suis assuré d'avance, en variant les conditions de cette expérience, que, dans l'air, le trou se forme toujours en contact de la pointe qui communique avec

l'armature externe de la bouteille. D'après ces expériences, la décharge secondaire a une direction contraire à celle de la bouteille et à celle indiquée en même temps par l'aimantation. J'ai fait encore d'autres recherches sur les décharges induites des ordres supérieurs, en employant tantôt le galvanomètre, et tantôt le *perce-carte*, suivant que le circuit induit était ouvert ou fermé. J'ai constamment trouvé que si les deux circuits qu'on compare, l'un comme inducteur, l'autre comme induit, sont tous les deux fermés ou tous les deux ouverts, la direction de la décharge induite est opposée à celle de l'inductrice. Si, au contraire, l'un des circuits est ouvert et l'autre fermé, la décharge induite est dans le même sens de la décharge inductrice. Je m'empresse de vous faire remarquer que le trou fait dans le papier ne peut jamais indiquer que la direction de la première décharge induite.

Plus récemment, M. Verdet a eu recours à une nouvelle méthode qui est fondée sur la polarisation acquise par deux électrodes de platine qui plongent dans un liquide, entre lesquelles on a fait passer une décharge de la bouteille. On sait que si le circuit qui comprend ces électrodes et un bon galvanomètre est fermé immédiatement après la décharge, il y a un courant secondaire en sens contraire à la décharge. J'ai démontré, il y a déjà longtemps, que ces courants secondaires sont dus à la présence des deux gaz de l'eau développés sur les lames de platine, qui tendent à se recomposer sous l'influence de ce métal. M. Verdet a trouvé qu'en ayant le circuit induit fermé, il n'y avait pas de polarisation produite par la décharge secondaire, et que cette polarisation se manifestait lorsque le circuit induit était interrompu, et qu'une étincelle accompagnait la décharge induite. En augmentant la lon-

gueur de l'étincelle ainsi obtenue, la polarisation devenait plus grande, indiquant toujours une direction de la décharge secondaire semblable à celle de la bouteille. M. Verdet, qui a étudié également la décharge de troisième ordre, n'a pas trouvé de polarisation sensible lorsque le circuit est fermé, tandis qu'en obligeant la décharge induite à traverser une couche d'air et à produire l'étincelle, il a obtenu immédiatement les lames polarisées, de manière à indiquer la prédominance d'une décharge opposée à la décharge secondaire inductrice.

Il n'y a qu'une seule manière d'interpréter et de mettre d'accord les résultats de toutes les expériences que je vous ai rapportées; il faut considérer la décharge induite secondaire comme formée de deux décharges égales en quantité et de directions opposées, mais dont la vitesse ou l'intensité dans l'unité de temps est différente; lorsqu'une résistance est établie dans le circuit, la décharge directe qui est la plus intense, doit devenir prédominante. De même, chacune de ces décharges développe par induction deux décharges de troisième ordre de quantités égales d'électricité ayant une direction opposée et une intensité différente; le courant prédominant ou le plus fort est toujours celui qui se développe au commencement de l'induction.

La propriété inductrice des décharges électriques une fois prouvée, on pouvait s'attendre à trouver que cette décharge fût accompagnée, comme le courant voltaïque, à son commencement et à sa fin, par des phénomènes d'induction analogues à ceux qui sont développés dans un circuit extérieur. C'est à M. Dove, et tout récemment à M. Buff, qu'on doit les expériences principales, tentées pour prouver l'existence des deux décharges induites, inverse et directe, dans l'arc même de la bouteille, à chaque

décharge principale. Lorsque le conducteur avec lequel on reçoit l'étincelle de la machine électrique est double, et formé d'une partie contenant une spirale cylindrique dont les spires sont bien isolées entre elles, et d'une autre partie qui comprend un galvanomètre et un intervalle d'interruption, on obtient, par une série d'étincelles, une déviation qui varie avec la longueur de cette interruption, et qui est tantôt plus grande, tantôt nulle et tantôt de direction contraire à celle qu'on a quand la spirale n'est pas dans l'arc de la décharge. Ces phénomènes s'expliquent facilement en admettant que les deux extra-courants produits par la spirale sont égaux en quantités et opposés en directions, mais d'une intensité différente.

Nous devons donc nous représenter les étincelles d'une batterie ou d'une machine électrique, comme accompagnées des décharges induites alternativement de sens contraires; de là la cause, ou du moins une des causes des mélanges explosifs que Wollaston a obtenus en décomposant l'eau avec les étincelles de la machine électrique, et des alternatives trouvées par Savary dans le sens de l'aimantation produite par une décharge électrique dans des aiguilles d'acier placées à des distances différentes.

Je terminerai cette leçon par quelques considérations théoriques, dans le but de coordonner un certain nombre des faits que je vous ai décrits.

De quelque manière qu'on se représente le nouvel état d'équilibre électromoléculaire que le courant électrique développe par induction dans un circuit métallique, et qui est accompagné d'un courant induit, dont la durée est très-grande en comparaison de la vitesse de la propagation du fluide électrique, il résulte de l'ensemble des phénomènes exposés dans cette leçon, que cet état et la loi de

son développement dépendent de la variation correspondante qui a lieu dans le fil inducteur, lorsque le courant commence ou cesse de passer. La somme des forces électromotrices, induites pendant les deux périodes d'accroissement et de décroissement de l'état électrique du fil inducteur, sera la même, comme en effet il est prouvé par l'égalité des effets électrolytique et galvanométrique des courants induits inverses et directs; mais l'intensité de ses courants dans l'unité de temps sera différente, suivant la durée des actions inductrices.

En partant de ces considérations, on peut s'expliquer pourquoi, comme l'a trouvé M. Lallemand, l'action répulsive entre une série de courants induits inverses et les courants inducteurs est plus grande que l'action attractive qui s'exerce entre ces courants et les courants induits directs. En effet, puisque le courant direct n'atteint son *maximum* qu'au moment où cesse le courant inducteur, et continue lorsque le circuit voltaïque est déjà ouvert, ce qui n'a pas lieu pour le courant induit inverse, il faut bien que l'action mutuelle qui est représentée par la somme de toutes les impulsions imprimées par le courant voltaïque sur les courants induits, inverses ou directs, soit dans le sens trouvé par M. Lallemand. Les mêmes considérations sur la proportionnalité entre les variations de l'état électrique du fil conducteur au commencement et à la fin d'un courant, et les forces électromotrices élémentaires développées par induction, doivent nécessairement s'étendre à la production des courants induits des ordres supérieurs. Quelque courte que soit la durée d'un courant induit, elle aura certainement une valeur finie, et la perturbation de l'équilibre électromoléculaire qui constitue ce courant doit augmenter par degrés jusqu'à ce qu'elle atteigne son dé-

veloppement *maximum*, pour diminuer ensuite jusqu'à zéro. De là vient la production pour chaque courant induit de deuxième ordre, de deux courants induits de troisième ordre, de sens contraire, qui doivent se succéder à un intervalle de temps très-court, et que l'expérience nous a prouvé être formés de quantités égales d'électricité. L'intensité de ces deux courants sera différente suivant la forme des courbes d'accroissement ou de décroissement de chaque courant induit qui devient inducteur, et, comme la première courbe dépend du temps de la variation du courant voltaïque, tandis que pour la seconde la forme sera constante, on peut concevoir jusqu'à un certain point que l'intensité du courant inverse des ordres supérieurs soit toujours plus grande que celle du courant direct correspondant.

Il nous reste à considérer la décharge de la bouteille, comme nous l'avons fait pour les courants voltaïques; cette décharge, ou plutôt la succession de décharges d'intensité toujours décroissante qui la composent, aura toujours les deux périodes d'accroissement et de décroissement dans les quantités des fluides électriques dont l'équilibre est successivement troublé et rétabli. Il est naturel de supposer que la première période qui correspond à l'augmentation des états électriques contraires et qui précède la décharge, ait une durée plus longue que la décharge qui succède, ce qui explique l'intensité plus grande de la décharge induite directe, ou la direction de la décharge secondaire qui a été généralement reconnue avec la méthode de l'aimantation.

DEUXIÈME LEÇON

Lois de l'induction électrodynamique et phénomènes généraux de l'induction dans les masses métalliques en mouvement.

Nous avons longuement étudié, dans la leçon précédente, le développement et les propriétés des courants induits dans les conducteurs filiformes. Nous devons maintenant nous occuper des lois de ces courants.

Il est nécessaire, avant tout, de décrire les méthodes suivies pour établir ces lois.

M. Abria, après avoir fait un grand nombre d'expériences sur l'aimantation par les courants, a cherché de déterminer les rapports entre l'intensité du courant inducteur et celle de chacun des deux courants auxquels il donne naissance, en établissant les rapports entre l'aimantation produite par ces courants. Le procédé de M. Abria consiste à ajouter aux deux circuits l'inducteur et l'induit, formés de deux rectangles de fil de cuivre ou de deux spirales planes, deux hélices égales; une aiguille d'acier d'un demi-millimètre de diamètre et de 16 millimètres de longueur, introduite d'abord dans une des hélices et puis dans l'autre, est ainsi soumise successivement à l'action du cou-

rant induit et puis à celle du courant inducteur. On déduit, par la durée de l'oscillation de l'aiguille après chaque aimantation, le rapport de l'intensité de ces courants, qu'on exprime par une fraction décimale en prenant pour unité l'intensité du courant inducteur.

Il est à peine nécessaire de vous rappeler ici que, pour avoir l'aimantation du courant induit inverse, il faut introduire l'aiguille dans l'hélice avant que le circuit inducteur soit fermé et la retirer avant qu'il soit ouvert, et qu'on doit faire le contraire pour avoir l'aimantation due au courant direct. Je n'insisterai pas sur les difficultés qui dépendent des variations du courant inducteur et des différences dans l'état des aiguilles, qu'on rencontre dans l'application de cette méthode, et qui n'ont pu être surmontées qu'avec beaucoup de patience et d'habileté.

M. Lenz avait déjà employé une méthode semblable dans ses premières recherches sur l'induction.

Faraday, dans son Mémoire, décrit quelques expériences sur le développement de l'induction dans des métaux différents, qui ont été le point de départ de la méthode que nous allons décrire ; dans ces expériences, les deux circuits, qu'on veut comparer, sont disposés de manière à faire entrer en sens contraire, dans le fil du galvanomètre, les deux courants développés dans le même temps et par la même force inductrice.

Au congrès scientifique de Florence qui eut lieu en 1841, j'ai décrit un appareil que j'avais montré déjà dans mes cours et que j'ai appelé *inductionomètre différentiel*. Cet appareil (*fig.* 7) consiste en trois spirales planes *abc* montées sur des pieds de cristal qu'on fait glisser dans une coulisse pratiquée sur une planche. On peut employer pour circuit inducteur les deux spirales latérales

ae qui agissent sur la spirale du milieu *b* et tendent à développer des courants induits en sens contraire. On peut aussi, suivant la recherche qu'on veut tenter, se servir de la spirale du milieu comme inductrice et faire entrer en sens contraire dans le fil du galvanomètre les courants induits développés dans les deux spirales latérales. De quelque manière qu'on opère, on parvient, en variant les distances entre les spirales, à trouver l'équilibre des deux actions inductrices opposées. On conçoit comment, avec cette méthode, on se rend indépendant de la constance des courants inducteurs, de l'état magnétique des aiguilles du galvanomètre, de la résistance ou de la longueur réduite des circuits induits, et enfin de la *lecture* de la déviation produite d'un mouvement impulsif par les courants induits. Dans cette disposition, on peut employer des courants inducteurs aussi forts que l'on veut, et comme le système magnétique du galvanomètre est soumis à l'action de deux courants contraires dans la position de sa plus grande sensibilité, on parvient à donner à cette manière d'opérer toute la rigueur et la sensibilité qu'on peut désirer. Une double roue d'interruption *r* (*fig.* 7) sert, comme nous l'avons déjà dit, à obtenir une série de courants induits, directs ou inverses. Un galvanomètre *g* à fil court, portant un bon système astatique, inséré dans le circuit induit, complète l'inductionomètre différentiel. Il est utile dans quelques expériences de substituer aux spirales planes, deux bobines formées chacune de deux spirales cylindriques superposées (*fig.* 7 *bis*) : les deux spirales internes, réunies de manière à faire une spirale continue, servent pour le courant voltaïque qui passe par une roue d'interruption; les deux spirales externes, réunies à la deuxième roue d'interruption, communiquent avec le fil

du galvanomètre de manière à y faire entrer leurs courants induits de sens contraire.

Il m'est bien facile de vous montrer comment on opère avec l'inductionomètre différentiel. Un courant d'une pile de 6 à 8 éléments de Grove passe dans la spirale inductrice du milieu *b* (*fig.* 7), et les deux spirales latérales *a* et *e*, placées à un décimètre de distance de cette spirale, contiennent le galvanomètre et forment le circuit induit. En faisant agir la double roue d'interruption, malgré la grande distance entre ces circuits, et quoiqu'on ait eu soin de faire les deux spirales induites aussi égales que possible, on voit l'aiguille dévier de quelques degrés d'un côté ou de l'autre. En éloignant ou en rapprochant tantôt l'une, tantôt l'autre des spirales induites, on reconnaît par le sens de la déviation quelle est celle prédominante, et on s'assure en même temps de toute la sensibilité de la méthode. On voit en effet, après être arrivé à force de tâtonnements à trouver l'équilibre des deux courants induits, que si l'une des spirales est déplacée d'une quantité très-petite, on a une déviation très-grande. On peut donc, avec ce procédé, mesurer une très-petite fraction de la force totale.

Nous pouvons maintenant passer à l'exposition des lois de l'induction, dont la découverte est due aux recherches expérimentales de Faraday, Lenz, Dove, Abria, Wartmann, Weber, Marianini, Matteucci, et dernièrement à celles de M. Felici.

Je vous démontrerai d'abord que le *développement de l'induction est indépendant de la nature du corps isolant interposé entre les circuits métalliques, l'inducteur et l'induit.*

Je mets les deux spirales induites en équilibre et je

vois que cet équilibre n'est nullement troublé en interposant une lame de verre, de gomme laque, d'acide stéarique, de soufre, etc., entre la spirale inductrice et une des induites. J'ai fait cette expérience en employant un galvanomètre très-délicat et un courant voltaïque très-fort, et le résultat a été le même.

J'ai fait une expérience semblable en plaçant une couche de *vide* barométrique entre la spirale inductrice et l'induite. J'ai pris pour cela deux bobines ayant chacune deux spirales, comme dans l'inductionomètre déjà décrit (*fig.* 7 *bis*); une de ces bobines a la spirale extérieure autour de la partie supérieure du tube d'un baromètre, et l'autre spirale dans l'intérieur. L'équilibre a persisté soit en laissant l'air atmosphérique dans le tube, soit en y faisant le vide barométrique. Le résultat n'a pas changé en employant la spirale intérieure pour inductrice et l'autre pour induite.

J'ajouterai, à ce sujet, qu'en interposant entre les deux spirales une lame métallique de cuivre, d'argent, de bismuth, etc., l'équilibre dans l'aiguille du galvanomètre n'est pas sensiblement troublé. Nous avons déjà vu dans la leçon précédente que l'interposition d'une lame métallique fait seulement varier l'intensité du courant induit, et par conséquent l'étincelle, la secousse et l'aimantation, sans altérer les produits électrolytiques et la déviation galvanométrique, ou la quantité d'électricité développée par induction. En employant l'inductionomètre dans les conditions les plus favorables, j'ai dû faire usage d'une lame de cuivre très-épaisse pour avoir une très-petite indication dans le même sens que l'aurait produite une lame très-mince de fer, qui rend l'induction beaucoup plus faible en neutralisant en partie, par son ma-

gnétisme contraire, l'action de la spirale inductrice : il est probable que l'action trouvée dans une grosse lame de cuivre dépend de la petite quantité de fer qui entre dans le cuivre du commerce.

Sans changer de méthode ni d'appareil, je puis aussi vous démontrer la proposition suivante : *Un fil métallique soumis à l'influence d'un aimant très-fort ou aimanté, s'il est de nature magnétique ou conduisant un courant électrique, est sujet à l'induction comme s'il était à l'état naturel.*

Je prends deux couples de spirales planes et je mets en équilibre les deux spirales induites de la manière que je vous ai déjà tant de fois décrite. Un de ces couples étant placé entre les pôles d'un électro-aimant très-puissant, l'équilibre n'est pas troublé lorsqu'on répète l'expérience après que l'électro-aimant a été mis en activité.

Dans une autre expérience, un gros barreau de fer que je pouvais aimanter avec une spirale qui l'entourait, était réuni à un fil de cuivre, et le couple, fer et cuivre, dont les deux branches étaient repliées parallèlement entre elles, était placé entre les pôles d'un électro-aimant. En faisant agir les roues d'interruption, il n'y avait pas de courants induits dans ce couple, ni avant ni après avoir transformé le barreau de fer en un aimant. Enfin je mets en équilibre les deux couples de spirales planes, et je trouve que cet équilibre persiste, même en faisant passer un faible courant dérivé dans une des spirales induites, pourvu qu'on tienne compte de la diminution de ce courant par les interruptions de la roue.

Je vais vous démontrer, avec un inductionomètre différentiel encore plus simple que celui que je vous ai déjà décrit, une troisième proposition : *La force des courants*

induits est proportionnelle à celle des courants inducteurs. M. Lenz et M. Abria avaient déduit cette proposition de leurs expériences faites avec la méthode de l'aimantation.

Autour d'un cylindre de bois *pq* (*fig.* 6) je dispose trois anneaux de fil de cuivre *ce*, *ab* et *df*. Les deux anneaux externes ou inducteurs entrent dans le circuit de la pile, et l'anneau intermédiaire, placé à égale distance des deux autres, communique avec le galvanomètre et forme le circuit induit. Ces deux circuits sont interrompus au moyen de deux roues, de manière à ne laisser entrer dans le galvanomètre que la série successive d'un des courants induits. En faisant passer le courant voltaïque en direction contraire dans les deux anneaux inducteurs, et en tenant l'anneau induit exactement au milieu, on parvient à détruire l'action inductrice, et l'on voit l'aiguille du galvanomètre rester à zéro quand on fait tourner les roues. Pour juger de la sensibilité de ce procédé, quoique chaque circuit soit réduit à un seul fil métallique, je n'ai qu'à vous faire voir qu'en déplaçant un tant soit peu l'anneau induit d'un côté ou de l'autre, on a tout de suite des courants induits très-forts et de directions opposées. Je substitue maintenant au fil d'un des anneaux inducteurs, un faisceau formé de fils de cuivre couverts de soie entortillés ensemble et qui communiquent entre eux par leurs bouts seulement; nous voyons alors l'équilibre persister comme auparavant.

Ainsi donc, un nombre quelconque de courants inducteurs produit la même induction qu'un seul courant dont l'intensité est *égale à la somme des intensités des courants* dans lesquels il est divisé, ce qui nécessairement démontre que la force des courants induits est simplement proportionnelle à celle des courants inducteurs.

Je puis encore vous donner la démonstration expérimentale de cette proposition d'une autre manière qu'il nous sera utile de connaître. Je prends deux cylindres de bois, dont chacun porte deux anneaux de fil de cuivre à la même distance, l'un desquels est l'inducteur et l'autre l'induit. Les deux anneaux inducteurs sont réunis ensemble de manière à former le circuit de la pile ; les deux anneaux induits forment aussi un seul circuit en communication avec le galvanomètre, mais tellement disposés que les courants induits sont dirigés dans le galvanomètre en sens contraire. En plaçant les deux cylindres à une assez grande distance pour qu'ils n'aient pas d'influence l'un sur l'autre, et en tenant les deux anneaux de chaque cylindre également éloignés entre eux, il n'y a pas de déviation dans l'aiguille lorsqu'on fait agir les roues d'interruption : dans cette expérience, les courants inducteurs sont égaux et les courants induits éprouvent la même résistance, qui est celle des deux circuits réunis.

Imaginons maintenant que l'on compose ces quatre anneaux d'un certain nombre de tours du même fil de cuivre. Nous trouverons alors que, pour faire subsister encore l'équilibre des deux couples d'anneaux, il faut que les produits du nombre des tours des deux circuits, l'inducteur et l'induit, soient égaux pour chaque cylindre. Ainsi, par exemple, en ayant un des circuits inducteurs formé d'un seul tour et l'autre de dix, il faut que l'anneau induit qui correspond à ce dernier soit d'un seul tour, et l'autre de dix tours. Je n'ai pas besoin d'insister sur l'interprétation trop évidente de cette expérience : sur un cylindre les dix tours du circuit inducteur rendent la force inductrice dix fois plus grande, comme on l'obtient avec les dix tours du circuit induit. Lorsque la résistance du circuit

induit et l'intensité du courant inducteur restent constantes, *les courants induits sont proportionnels au produit des longueurs du circuit inducteur et de l'induit.*

Sans rien changer à la disposition de l'appareil (*fig.* 6) que je viens de vous décrire, je vais remplacer successivement un des anneaux inducteurs de fil de cuivre par des anneaux faits avec d'autres métaux, tels que le fer, le bismuth, le mercure, etc., d'une épaisseur et d'une forme très-différentes entre eux. Dans tous ces cas, l'aiguille du galvanomètre reste à zéro ; ainsi, *quelle que soit la nature du métal, la section et la forme du circuit inducteur, la force électromotrice développée par une certaine quantité d'électricité est la même.*

Voyons maintenant quelle est l'influence exercée sur la force des courants induits par la nature et la résistance des circuits. Nous n'avons pour cela qu'à intervertir la fonction des trois anneaux que nous avons déjà employés; l'anneau du milieu devient l'anneau inducteur, et les anneaux externes sont les circuits induits disposés de manière à faire entrer les courants dans le galvanomètre dans des directions opposées. Après avoir déterminé avec exactitude la position d'équilibre de ces circuits, il nous est facile de changer un des anneaux induits formé d'un fil de cuivre en un anneau de bismuth, de fer, de mercure ou d'un métal quelconque de formes ou de sections différentes. L'équilibre subsiste également dans tous les cas.

Je pourrais vous répéter cette expérience en employant comme force inductrice un électro-aimant très-fort. Pour cela on ajuste en contact deux longs barreaux de deux métaux différents qu'on couvre de soie ou de vernis, excepté les deux bouts du côté où ils sont soudés ensem-

ble, tandis que les deux autres bouts sont réunis aux extrémités du galvanomètre. En fixant le milieu de cette double tige entre les pôles d'un très-fort électro-aimant et en ouvrant et fermant le circuit avec les roues, il n'y a jamais signe d'induction, quelle que soit la sensibilité du galvanomètre, pourvu qu'on ait soin d'éviter l'induction de l'électro-aimant sur les parties du circuit induit qui ne sont pas entre les pôles. Ce résultat conduit nécessairement à la conclusion que *la force électro-motrice, développée par l'induction d'un courant voltaïque sur un circuit conducteur quelconque, est indépendante de la nature du métal ou du conducteur qui est sujet à l'induction.*

Pour prouver toute la généralité de cette proposition, je dois ajouter qu'on peut obtenir les signes de l'induction développée dans les conducteurs liquides. A cet effet, j'emploie le grand électro-aimant et je place entre les pôles une spirale formée avec un gros tube de *gutta-percha* rempli d'une solution d'eau et d'acide sulfurique qui entoure un cylindre de fer doux. Les extrémités de cette spirale liquide communiquent, par deux fils de cuivre couverts de soie et entortillés ensemble, aux extrémités d'un galvanomètre à fil fin et long.

Il serait important de rechercher si l'influence du temps sur le développement de l'induction varie avec la nature des corps induits et principalement avec le pouvoir conducteur.

Pour compléter les propositions précédentes, je n'ai plus qu'à vous prouver par une expérience directe et très-simple, due à M. Felici, que l'intensité des courants induits est en raison inverse de la *longueur réduite* du circuit induit. Pour faire cela, nous reprendrons les deux cylindres de bois sur chacun desquels il y a un anneau

inducteur et un anneau induit, qu'il faut former avec le même nombre de tours de fils de cuivre couverts de soie et bien réunis ensemble. Les deux circuits induits restent distincts et sont réunis séparément aux deux circuits qui composent le galvanomètre différentiel de M. Becquerel. Si les distances des anneaux sont les mêmes pour les deux cylindres et si les courants induits ont une direction opposée dans les deux fils du galvanomètre, l'aiguille reste fixe à zéro lorsqu'on fait agir le courant inducteur. Qu'on double maintenant la longueur réduite du circuit total induit en ajoutant du fil de cuivre en dehors d'un des cylindres, et l'on trouvera que, pour avoir encore l'équilibre, il faut réduire de moitié le nombre des tours du circuit inducteur de l'autre cylindre.

Pour achever l'exposition des recherches expérimentales tentées pour établir les lois de l'induction, il nous resterait à voir comment l'action inductrice varie avec la distance. Dans cette étude, on n'a pu recourir à l'expérience que dans quelques cas particuliers. C'est ainsi que M. Abria, avec sa méthode de l'aimantation, a déterminé la variation dans la force du courant induit dans une spirale plane placée à des distances différentes de la spirale inductrice.

Les résultats obtenus par ce physicien s'accordent à établir que l'intensité du courant induit décroît à mesure que la distance augmente, suivant une loi qui est la même pour les deux courants, et telle que l'action inductrice varie sensiblement, d'abord en raison inverse de la racine carrée de la distance, ensuite de la simple distance.

M. Felici a démontré par des expériences exécutées suivant la même méthode sur laquelle est fondée l'inductionomètre différentiel, que dans deux anneaux parallèles,

l'inducteur et l'induit, ayant le même diamètre, et dont les centres sont sur la même droite normale à leur plan, la force des courants induits croît proportionnellement au diamètre des anneaux, lorsque le rapport des distances à ce diamètre reste constant.

Pour ne vous laisser ignorer aucune des expériences qui peuvent servir de fondement à la théorie mathématique de l'induction dans les conducteurs filiformes, j'ajouterai que M. Felici a prouvé qu'un anneau inducteur formé avec un conducteur sinueux a la même action inductrice qu'un anneau ordinaire.

Ce même physicien a démontré qu'en ayant deux circuits inducteurs qui se font équilibre dans une certaine position lorsque leur action inductrice est développée en fermant ou en ouvrant le circuit de la pile, cet équilibre persiste encore lorsqu'on fait agir ces circuits en les portant à la première position en partant d'une autre plus éloignée du circuit induit.

Ajoutons encore un autre fait démontré d'abord par les expériences de Faraday et ensuite par celles de M. Abria et de M. Wartmann, et qui résulte nécessairement du principe de l'inductionomètre différentiel ; c'est que l'intensité du courant induit par deux fils inducteurs est la somme ou la différence des courants induits par chacun de ces fils séparément.

En se fondant sur ces propositions qui résultent de l'expérience et en admettant que la somme des courants induits dans un circuit quelconque pendant son passage d'une position à une autre, relativement au circuit inducteur, est égale à la différence de deux courants obtenus en faisant agir le courant voltaïque dans ces deux positions, pendant que l'autre circuit est immobile, M. Felici est parvenu

à exprimer la force électromotrice induite, par la formule

$$\left(A \cos \omega + B \cos \theta \cos \theta'\right) \frac{i\, ds\, ds'}{r}$$

dans cette formule, r est la distance de deux éléments de conducteurs filiformes ds et ds' ; ω, θ, θ' les angles que les éléments font entre eux et avec la droite r ; i la force du courant inducteur, et A et B deux constantes.

La force électromotrice induite par un changement infiniment petit de la position relative de deux éléments ds, ds' aura une valeur proportionnelle à la variation que le même changement de position fait souffrir à la valeur exprimée par cette formule. Il résulte de cette formule, que nous avons rapportée parce qu'elle est l'expression des lois de l'induction dans les conducteurs filiformes donnée par l'expérience, que la force du courant décroît beaucoup plus faiblement avec la distance pour les effets d'induction que dans les attractions et les répulsions mutuelles des conducteurs électrodynamiques.

L'analogie qui existe dans la forme analytique, entre la formule célèbre trouvée pour les actions électrodynamiques et celle de l'induction qui a été déduite en suivant la même méthode d'Ampère, mérite d'être remarquée comme l'expression de la manière conforme d'agir du courant dans les deux phénomènes.

Il est temps d'arriver à l'étude de l'induction développée dans des masses métalliques ; mais, avant de vous montrer les expériences fondamentales de ce phénomène, il n'est pas inutile de vous décrire encore une expérience tentée sur un conducteur filiforme, qui peut être considérée comme un cas de transition entre l'induction sur les fils et sur les masses continues. Voici (*fig.* 8) un électro-aimant cylindrique placé avec son axe vertical ; j'ai

tracé avec de l'encre la direction des courants qui circulent autour du pôle supérieur. Je prends dans les mains un fil de cuivre *bdc* dont les extrémités sont réunies à un bon galvanomètre, et avec la portion du fil que je tiens horizontalement et au niveau du pôle, je traverse rapidement ce pôle d'un côté à l'autre, et je porte le fil dans la position *bec*. J'obtiens à l'instant un courant induit dans le sens suivant lequel est dirigé le courant de l'électro-aimant du côté par où je commence à mouvoir le fil. Ce résultat est constant, quel que soit le point de départ du fil relativement au pôle, pourvu qu'on ne renverse pas la portion induite du fil et qu'on fasse toujours le même mouvement de translation.

Si, laissant le fil en repos, on fait mouvoir l'électro-aimant en sens contraire au mouvement qu'on donnait au fil dans les expériences précédentes, on aurait encore le même courant induit. Il n'y aurait plus d'induction si le pôle et le fil conducteur se mouvaient ensemble et avec la même vitesse.

En imaginant un fil conducteur transporté parallèlement à lui-même en face d'une des extrémités d'un solénoïde ou d'un électro-aimant, on peut rapprocher le cas que nous examinons du fait fondamental de l'induction entre deux conducteurs filiformes et parallèles. En effet, l'action inductrice des deux côtés du circuit de l'électro-aimant entre lesquels le fil se meut parallèlement à lui-même, pour se transporter de l'un à l'autre, doit produire un courant qui sera dans le même sens que le courant de la bobine, pris du côté d'où il s'éloigne, et par conséquent dans le sens contraire à celui dont il s'approche. Cette portion du circuit induit, en se mouvant en face du pôle de l'aimant ou du solénoïde, devient ainsi le siége d'une

force électro-motrice temporaire dont les fluides électriques se neutralisent dans le reste du circuit; si le fil induit n'est pas réuni aux extrémités du circuit du galvanomètre et communique avec les plateaux du condensateur, on peut s'attendre à trouver ces plateaux chargés d'électricités contraires au moment où l'induction a lieu.

Considérons maintenant l'induction développée dans une masse métallique tournant en présence d'un aimant; nous n'aurons plus dans ce cas, comme dans les conducteurs filiformes, des directions déterminées dans lesquelles les courants induits se produisent, et le renouvellement continuel des points soumis à l'induction donnera lieu à des effets permanents. Prenons pour cela (*fig.* 9) un gros cylindre *c* de cuivre, qui, par un mécanisme très-facile à concevoir, peut tourner plus ou moins rapidement autour de son axe placé verticalement. Un électro-aimant cylindrique *ab* ou un barreau aimanté est disposé horizontalement avec son axe perpendiculaire à la surface du cylindre; il n'y a qu'à appliquer les deux bouts du galvanomètre sous le pôle aux extrémités d'une arête du cylindre *c* pour obtenir une déviation très-forte en faisant tourner le cylindre. L'aiguille se fixe à une certaine déviation qui est plus ou moins grande suivant la vitesse de la rotation. En faisant tourner le cylindre en sens contraire, ou en renversant le nom du pôle, on a la même déviation, mais dans la direction opposée. Si les extrémités du galvanomètre sont appliquées à la même distance de la projection du pôle, mais normalement à l'arrêt du cylindre, on ne trouve pas de courant. Ainsi donc, si une lame métallique se meut en présence du pôle d'un aimant, cette lame devient le siége d'une force électromotrice qui sera la cause des courants qu'on obtient en y

appliquant les extrémités du fil du galvanomètre dans des directions perpendiculaires à son mouvement, et dont la direction dépend du sens du mouvement et du nom du pôle magnétique inducteur.

Il est facile d'imaginer un appareil à l'aide duquel je pourrais faire tourner l'aimant avec les extrémités du galvanomètre dans le même temps que le cylindre : il n'y aurait qu'à placer l'aimant sur lequel ces extrémités aient été fixées, sur un anneau de bois concentrique à l'axe du cylindre de cuivre ; on verrait alors que, si le cylindre et l'aimant tournent dans le même sens et avec la même vitesse, l'induction est nulle, tandis qu'elle est la plus grande possible lorsque l'aimant et le cylindre se meuvent en sens contraire.

Puisque les courants développés dans les circuits filiformes se déchargent dans les points du circuit qui ne ressentent pas l'induction, on peut supposer que les parties de la lame où l'action inductrice est très-faible ou nulle, d'un côté et de l'autre du pôle, servent aussi à décharger ces courants. La direction des courants trouvés sur le cylindre est la même que celle que nous avons obtenue en faisant mouvoir sur le pôle un fil métallique en communication avec le galvanomètre. Lorsque le pôle austral d'un aimant (*fig.* 9) se trouve en face d'un cylindre de cuivre qui tourne dans le sens indiqué par la flèche, les courants induits qui se forment sous le pôle et qui se déchargent à droite et à gauche, donnent lieu à deux systèmes de courants qu'on doit concevoir fixes dans l'espace et qu'on peut représenter par les extrémités opposées d'un solénoïde : en avant du pôle austral, c'est une extrémité boréale qui se forme sur le cylindre tournant, et qui exerce par conséquent une action attractive sur le

pôle et en arrière de l'extrémité australe ou répulsive.

Le développement des courants induits dans les masses métalliques peut se produire de plusieurs manières. Je puis vous montrer ces courants induits dans un disque de cuivre. Imaginons que ce disque puisse tourner comme celui de la machine électrique; près du bord, et normalement à la surface du disque, plaçons le pôle d'un aimant et appliquons les deux extrémités du fil du galvanomètre sur cette surface.

Cette expérience est une des plus intéressantes que Faraday ait décrites dans son célèbre *Mémoire sur l'induction.*

Nous verrons d'abord que les courants les plus forts s'obtiennent en tenant fixes les extrémités du galvanomètre en contact avec les extrémités du diamètre du disque qui passe sous le pôle. En faisant tourner le disque en sens contraire, les courants induits ont une direction opposée. En tenant les extrémités du galvanomètre à égale distance du pôle et dans un plan normal aux rayons du disque, on n'a pas de courants induits. Dans ce cas encore, les courants qui se développent sur le disque tournant circulent sous le pôle de l'aimant inducteur, parallèlement aux rayons, dirigés normalement au mouvement, tantôt du centre à la circonférence et tantôt en sens contraire, suivant le nom du pôle et le sens de la rotation.

Si, au lieu d'un seul pôle, on interpose le bord du disque entre deux pôles de nom contraire, les courants induits se développent également, mais avec une intensité beaucoup plus grande, tandis qu'entre deux pôles de même nom, ou avec un seul pôle placé normalement au bord du disque et avec l'axe magnétique dans le plan même du disque, l'induction est nulle. Ces expériences

avec le disque ne diffèrent de l'expérience faite avec le cylindre que par la forme de la masse métallique induite. Dans le disque comme dans le cylindre, les courants induits qui se forment et circulent sous les pôles ont la même direction, et l'on peut supposer également qu'ils se déchargent à droite et à gauche dans les parties du disque où l'action inductrice est nulle ou très-faible. Dans le disque comme dans le cylindre, les deux systèmes de courants qu'on se figure à droite et à gauche du pôle représentent les deux extrémités opposées d'un solénoïde : au-devant du pôle, dans le sens du mouvement, est l'extrémité de nom contraire au pôle de l'aimant inducteur, et derrière l'extrémité de même nom.

En faisant usage d'un aimant en forme de fer à cheval, qu'on fait tourner autour d'un axe vertical qui coupe à moitié la ligne polaire et passe par le centre d'un disque ou d'un globe de cuivre fixe, on trouve les mêmes phénomènes d'induction que nous venons de décrire, à la condition que les extrémités du galvanomètre tenues en contact du disque ou du globe tournent avec l'électro-aimant : si l'on fait tourner le disque en même temps que l'aimant qui porte avec lui les extrémités du galvanomètre, les courants induits seront nuls quand la rotation a lieu dans le même sens et avec la même vitesse, tandis qu'ils seront les plus forts possible si l'aimant et le disque tournent en sens contraire.

On peut aussi obtenir des courants induits d'un disque de cuivre qu'on fait tourner sous un aimant dont l'axe est parallèle au plan du disque, et qui a les pôles à égale distance du centre de rotation : les courants qu'on trouve en appliquant le galvanomètre sur les extrémités du diamètre du disque, qui est parallèle à la ligne polaire, varient éga-

lement de direction, suivant le sens de la rotation et le nom des pôles inducteurs. Si, sans rien changer au reste de l'expérience, on suppose d'avoir l'aimant au-dessous du disque, les courants induits auront une direction opposée; ceci explique pourquoi on n'obtient pas de courants induits, comme nous l'avons déjà remarqué, en plaçant l'aimant en face du bord et avec son axe dans le plan même du disque.

Quels que soient le métal et l'épaisseur des disques ou des cylindres employés dans ces expériences, la direction des courants induits ne varie pas, et l'intensité seulement est plus ou moins grande, suivant la conductibilité.

Dans la prochaine leçon, nous étudierons avec le plus grand soin la distribution des courants électriques développés par induction dans un disque métallique tournant en face d'un aimant, et nous verrons alors comment les actions électromagnétiques qui s'exercent entre l'aimant inducteur et les courants induits du disque suffisent à expliquer les phénomènes principaux du *magnétisme par rotation*. Bornons-nous pour le moment à conclure, d'après les expériences décrites, que l'induction se développe dans une masse métallique toutes les fois qu'on fait varier la distance relative entre les différents points de cette masse et l'aimant inducteur, de sorte qu'on peut considérer la force électromotrice induite comme proportionnelle à la vitesse de cette variation; que les courants induits transversalement au sens du mouvement, et qui ont la plus grande intensité en proximité des pôles, se propagent dans la masse métallique, et forment ainsi des systèmes électrodynamiques qu'on peut considérer comme fixes dans l'espace, quoique se renouvelant sans cesse dans les différents points de cette masse; que les

actions mutuelles exercées entre l'aimant inducteur et la masse induite tendent constamment à retarder leur mouvement relatif.

Nous devons enfin étudier le développement de l'induction dans une masse métallique mise en rotation autour d'un axe qui est le même que celui de l'aimant inducteur. Ce fait, qu'il suffit d'énoncer pour en saisir l'importance pour la théorie physique de l'induction, mérite une étude particulière, et je vous décrirai minutieusement les expériences avec lesquelles j'ai essayé dernièrement de l'analyser.

C'est encore à Faraday qu'appartiennent les expériences qui ont prouvé ce cas d'induction, car celles qu'on a faites après lui en Allemagne ne diffèrent des premières que par quelques variations peu importantes dans la forme des appareils.

Dans tous les phénomènes d'induction que nous avons étudiés jusqu'ici, le mouvement relatif de l'aimant et de la masse métallique induite se vérifie constamment, et les actions réciproques découvertes par M. Arago entre l'aimant et cette masse nous prouvent l'existence des courants induits. Ainsi, nous verrons qu'une aiguille aimantée est entraînée par la rotation d'un disque de cuivre, ou bien un disque entraîné par un aimant qui tourne au-dessous de lui. D'accord avec cette loi de l'induction, on trouve que ces actions sont nulles lorsque l'axe de l'aimant cylindrique tournant se trouve exactement dans le prolongement du fil de suspension appliqué au centre du disque, ou quand cet aimant est suspendu avec son axe vertical sur le centre d'un disque tournant. De quelque manière qu'un circuit fixe, et fermé avec le fil du galvanomètre, soit placé en proximité d'un aimant, tout aussi

puissant qu'on peut l'imaginer, nous savons aussi qu'il n'y a jamais d'induction développée dans ce circuit par la rotation de l'aimant autour de son axe. Tous ces résultats s'accordent avec le principe précédemment posé.

Voyons maintenant ce qui arrive lorsqu'on applique les extrémités du fil du galvanomètre sur un disque *a b* (*fig.* 10) tournant autour de son centre, placé dans le prolongement de l'axe de l'électro-aimant *c*. On a alors, en tenant une de ces extrémités en contact avec un point quelconque vers le bord du disque, et l'autre en contact avec le centre, des courants induits d'une direction constante et dont l'intensité augmente avec la vitesse de rotation et avec la distance entre le premier point et le centre. La direction devient opposée en changeant le sens de la rotation ou le pôle de l'électro-aimant. Faraday a prouvé qu'on obtient le même courant induit si le disque est appliqué sur une des bases d'un aimant cylindrique et si l'on fait tourner ensemble le disque et l'aimant en tenant toujours fixes les extrémités du galvanomètre. Il est indifférent pour le résultat que le disque soit isolé ou en communication métallique avec l'aimant. En partant de ces expériences, Faraday a pu obtenir ces mêmes courants induits avec une disposition en apparence plus simple et qui consiste à faire tourner un aimant cylindrique *a b* (*fig.* 11) sur son axe, et à appuyer les extrémités du fil du galvanomètre sur la surface de l'aimant, l'un près du pôle en *c* et l'autre vers l'équateur du cylindre en *d*. En faisant tourner ce cylindre comme l'index d'une montre, on a un courant induit dont la vitesse varie avec celle de la rotation et qui est dirigé dans le cylindre du pôle boréal à l'équateur. En portant une extrémité du fil du galvanomètre d'un pôle sur l'autre, tandis que l'autre

extrémité est laissée sur l'équateur de l'aimant, le courant est en sens contraire dans l'aimant, comme on l'aurait obtenu en renversant le sens de la rotation dans la première disposition. Si les deux extrémités du fil du galvanomètre sont appliquées sur les deux pôles de l'aimant tournant, il n'y a plus de courant induit. Les effets restent les mêmes, soit que les extrémités du galvanomètre touchent la surface de l'aimant ou bien deux anneaux métalliques en communication avec l'aimant. Ajoutons encore que ces résultats ne varient pas en tenant les anneaux isolés de l'aimant et en les faisant communiquer ensemble avec un fil métallique. On peut aussi faire tourner ces deux anneaux, indépendamment de l'aimant qui reste fixe, sans que les courants induits éprouvent la moindre variation.

Faraday, qui a récemment varié et analysé cette expérience de l'induction, que j'appellerai désormais *axiale*, a ajouté d'autres expériences pour prouver que l'aimant, outre son rôle d'inducteur, peut aussi fonctionner comme une partie du circuit induit. L'appareil que Faraday a employé dans ses dernières expériences consiste en deux barreaux aimantés, disposés l'un à côté de l'autre, avec leurs pôles de même nom situés vers la même extrémité, et qu'on fait tourner autour d'un axe commun. Un fil métallique partant de l'un des bouts polaires suit la direction de l'axe jusqu'au milieu du système magnétique, et, prenant dans ce point une position perpendiculaire à l'axe, il revient à son point de départ, après avoir décrit une ligne courbe plus ou moins longue et d'une forme quelconque à l'extérieur des aimants. Les deux bouts de ce circuit communiquent avec le galvanomètre par leurs points de contact avec les deux disques métalliques d'un commutateur fixé sur l'axe de rotation. On conçoit facilement com-

ment on peut rendre indépendante tantôt la partie extérieure de ce circuit, tantôt la partie axiale, et tantôt encore la portion qu'on peut appeler *radiale*, et faire ainsi mouvoir séparément ces différentes parties sans qu'elles cessent de communiquer entre elles. Les résultats que Faraday a trouvés s'accordent avec ceux que je vous ai déjà décrits. En faisant tourner ensemble les aimants et le circuit extérieur, il n'y a pas de courants induits, tout à fait comme si ce circuit était fixé à l'extérieur d'un aimant tournant autour de son axe. On a le même résultat en faisant tourner la seule portion du circuit qui est disposée dans l'axe de rotation. A l'aide d'un anneau métallique fixé sur le milieu des aimants, et sur lequel on tient appliquée l'extrémité correspondante de la partie extérieure du circuit pendant la rotation, on peut mouvoir séparément cette partie ou la partie radiale : c'est alors qu'on obtient des courants induits qui ont la même intensité, mais des directions opposées, suivant qu'on tient fixe une de ces parties et qu'on fait tourner l'autre, et *vice versâ*. Cette opposition de courants induits explique pourquoi ces courants manquent lorsque le circuit tourne tout entier avec l'aimant. On conçoit aussi comment, dans les expériences avec l'aimant cylindrique, la substance de l'aimant remplace par sa conductibilité les parties axiale et radiale du circuit.

Avant de formuler les résultats de ces expériences et de décrire celles que j'ai tentées de nouveau pour mettre en évidence si l'induction axiale dépend du même principe qui agit dans les autres cas d'induction, j'ai cru devoir répéter ces expériences de Faraday, en substituant un grand solénoïde construit avec toute l'exactitude possible à l'aimant cylindrique dont l'axe magnétique pouvait ne pas coïncider avec l'axe de figure. Après avoir centré

très-exactement un disque de cuivre autour de l'axe du solénoïde, j'ai fait tourner ce disque autour de son centre, dans un plan qui était le même que celui d'une des bases du solénoïde. J'ai obtenu alors les mêmes phénomènes d'induction qu'on a avec l'aimant cylindrique tournant, ou avec le disque tournant autour de l'axe d'un aimant.

J'ai encore répété ces expériences en prenant toutes les précautions pour que l'aimant cylindrique ou le disque de cuivre fussent bien centrés pendant la rotation : car si, par défaut de l'appareil, il n'en eût pas été ainsi, on aurait pu rattacher ce cas d'induction avec les autres que nous avons déjà étudiés. J'ai fait cette vérification en fixant l'aimant cylindrique ou le disque tournant dans le solénoïde sur l'axe d'un *tour* très-solide et construit avec soin. Les phénomènes obtenus ont été précisément les mêmes que ceux déjà décrits.

Il est donc démontré une fois pour toutes que le phénomène de l'induction axiale est indépendant de ces causes d'erreur qui pourraient le faire dépendre directement des autres cas d'induction précédemment étudiés. Pour se former une idée bien claire des circonstances principales de cette induction, il ne sera pas inutile de vous montrer une autre expérience, bien qu'elle ne diffère pas essentiellement de celles que j'ai déjà décrites. Je dispose un électro-aimant cylindrique *a* (*fig.* 30) de manière que son axe tombe normalement sur le centre d'un disque de cuivre *bc* amalgamé à sa surface : il est indifférent pour les résultats que ce disque soit fixé en contact de l'aimant ou qu'il soit indépendant de celui-ci. Un conducteur *de*, de fil de cuivre, est plié en forme de fourche, dont une extrémité touche le centre du disque, et l'autre le bord; les deux branches de cette fourche se soudent séparément aux

deux cercles métalliques d'un commutateur fixé sur une de ses branches, qui est celle du centre, et en même temps l'axe de rotation de la fourche. Il n'y a plus qu'à imaginer que deux ressorts communiquant avec le fil d'un bon galvanomètre pressent sur les deux cercles du commutateur, pour comprendre clairement la manière de fonctionner de cet appareil. Supposons que l'électro-aimant soit mis en activité avec son pôle boréal en bas sur le centre du disque, et faisons tourner le conducteur, dont les extrémités doivent rester constamment en parfait contact avec le disque, dans le même sens des courants qui circulent dans l'électro-aimant; nous aurons immédiatement un courant induit dans le disque dirigé de la circonférence au centre. Avec une rotation uniforme, la déviation sera bientôt fixe et on pourra l'augmenter en donnant au conducteur une rotation plus rapide. Si, au lieu du conducteur, c'est le disque que je fais tourner dans le même sens, le courant induit aura la même intensité, mais une direction opposée, comme si j'avais renversé le pôle ou fait tourner le conducteur en sens contraire. Il est évident que si le conducteur et le disque tournent ensemble, il n'y aura pas de courant induit, et que ce courant sera le plus fort possible si le disque et le conducteur tournent en sens contraire. J'ai substitué au disque continu un autre disque semblable qui avait été fendu en un grand nombre de secteurs bien séparés entre eux, et les courants induits obtenus étaient les mêmes pour la direction et pour l'intensité. En dernier lieu, je n'ai plus laissé qu'un très-petit disque au centre et un anneau concentrique sur les quels s'appuyaient les deux extrémités du conducteur : en faisant communiquer ensemble le disque et l'anneau avec un fil de cuivre, les résultats ont

été les mêmes que ceux obtenus dans les deux dispositions précédentes. Cet anneau et le disque du centre peuvent être remplacés par un disque de bois ayant au bord et au centre deux cavités que l'on remplit de mercure et qu'on fait communiquer avec le galvanomètre. En faisant tourner un fil de cuivre qui touche, d'une part, le centre, et de l'autre, l'anneau de mercure, et en ayant le disque posé avec son centre sur l'axe d'un électro-aimant, on a les mêmes courants induits.

Les conditions dans lesquelles on peut obtenir l'induction axiale sont donc clairement établies suivant les expériences de Faraday, et suivant celles peut-être encore plus simples que je vous ai décrites en dernier lieu : il faut, d'abord, que la portion mobile du conducteur qui tourne autour de l'axe de l'aimant ne forme pas un circuit fermé, et que les deux extrémités de ce conducteur ne reviennent pas à l'axe. Pour que cette induction ait lieu, les deux extrémités de la portion mobile du circuit doivent se trouver à une distance différente du pôle inducteur, et une de ces extrémités au moins doit parcourir un certain espace à mesure qu'elle se meut.

Les conditions de l'induction axiale ainsi formulées, je remarquerai qu'on a essayé de les rattacher à celles de l'induction dans les conducteurs filiformes ou dans le disque tournant d'Arago. A ce propos on s'était fondé sur le rapprochement remarquable que M. Lenz a fait connaître peu de temps après la découverte de Faraday, entre les actions électrodynamiques d'Ampère et les phénomènes d'induction. Nous avons déjà décrit, dans la première leçon, la formule avec laquelle on peut exprimer la loi de l'induction par les actions électrodynamiques qui se développent entre l'aimant inducteur et le courant induit.

En passant en revue les différents cas dans lesquels il y a une action électrodynamique entre un aimant et un conducteur voltaïque ou entre deux de ces conducteurs, M. Lenz a montré que si l'un de ces conducteurs est remplacé par un autre à l'état naturel, il y a dans celui-ci, lorsqu'on le fait mouvoir en présence de l'autre, un courant induit; le sens de ce courant est tel, que l'action électrodynamique entre le circuit induit et le circuit inducteur, tend à produire un mouvement inverse de celui qu'on opère mécaniquement pour développer l'induction : si l'action mutuelle de deux courants, ou d'un courant et de l'aimant, ne peut produire qu'un mouvement limité, tel qu'une attraction ou une répulsion, ou une déviation dans un sens ou dans l'autre, l'effet de l'induction correspondante consiste dans un courant instantané, tandis que, lorsque l'action électrodynamique donne lieu à un mouvement de rotation, l'action inductrice correspondante développe un courant continu. Cette liaison entre les actions électrodynamiques et les phénomènes de l'induction, qui est évidente pour le plus grand nombre des cas, s'étend aussi à l'induction axiale. En effet, il n'y a qu'à se rappeler les conditions établies par Ampère, dans lesquelles les rotations électromagnétiques peuvent avoir lieu, pour s'assurer qu'elles sont les mêmes que celles reconnues jusqu'ici nécessaires pour le développement de l'induction axiale. Pour nous en convaincre, reprenons le disque de bois que nous avons décrit dans une des expériences précédentes sur l'induction axiale; si ce disque est placé avec son centre sur celui de la surface polaire d'un électro-aimant, et si l'on fait communiquer avec les extrémités du galvanomètre le mercure du centre et celui de l'anneau, on obtient un courant induit en faisant tourner

le *fil radial*. Maintenant faisons passer dans ce fil, convenablement suspendu, un courant qui soit dans le même sens que le courant induit obtenu tout à l'heure, et nous verrons ce fil prendre un mouvement de rotation contraire à celui qu'on lui a communiqué mécaniquement pour développer le courant induit.

Cette expérience nous montre clairement que le rapprochement de M. Lenz s'étend au cas de l'induction axiale que nous venons d'étudier. Mais dans l'obscurité qui règne sur la nature du courant électrique et sur la cause des actions mutuelles entre les conducteurs voltaïques, n'est-il pas à craindre qu'on soit tenté d'exagérer la portée de ce rapprochement et de croire que le phénomène de l'induction axiale est analysé parce qu'on a trouvé un certain nombre de cas dans lesquels il existe une liaison entre celui-ci et un autre phénomène dont on ignore la nature? Nous savons que M. Neumann s'est fondé sur l'hypothèse, que la force électromotrice produite par le mouvement d'un élément induit est proportionnelle à l'action électrodynamique exercée par le circuit inducteur sur cet élément, comme si celui-ci était parcouru par un courant égal à l'unité, en prenant cette action décomposée suivant la direction de la vitesse de l'élément, multipliée par celle-ci, et qu'il a ainsi (par un travail analytique remarquable) formé une théorie de l'induction applicable aux seuls circuits filiformes et fermés; mais quelle lumière pouvons-nous tirer de cela pour interpréter l'induction axiale? D'un autre côté, quelle est la *signification physique* qu'on peut attribuer à des résultats analytiques obtenus en accouplant la formule d'Ampère avec celle des actions électrostatiques modifiées par l'hypothèse de la différence dans les vitesses

relatives des deux fluides? N'est-il pas démontré par l'expérience, comme nous le verrons même dans ce cours, que, tandis qu'il y a des actions mutuelles très-fortes entre les conducteurs voltaïques ou entre l'aimant et ces conducteurs, ces actions n'ont aucun effet sur les fluides électriques considérés indépendamment de la matière pondérable? Ne savons-nous pas que les actions électrodynamiques et l'induction se propagent à travers tous les milieux, indépendamment de leur nature, et même à travers le *vide*, sans souffrir aucune variation sensible, ce qui est bien loin d'être le cas des forces électrostatiques? Si, dans des circonstances tout à fait exceptionnelles, comme dans les expériences récentes que Faraday a faites sur des grandes longueurs de fil de cuivre couvert de *gutta-percha* et plongées dans la terre, on a vu le courant électrique exercer une *influence latérale*, peut-on sérieusement imaginer que ce résultat ait une relation quelconque avec l'induction que nous étudions? Quel est l'exemple tiré des autres forces d'attraction ou de répulsion que nous connaissons dans la nature, qui ne soit contraire à l'hypothèse qu'on est forcé de faire pour expliquer les actions électrodynamiques et l'induction, en attribuant aux forces électrostatiques des effets différents suivant les vitesses relatives des fluides électriques?

Ces considérations et bien d'autres, sur lesquelles il est superflu de s'arrêter, nous ont amené depuis longtemps à croire qu'au lieu de se fonder sur le cas de l'induction dans les conducteurs filiformes et fermés, pour faire une théorie qui devrait embrasser tous les autres cas, il fallait auparavant démêler, par de nouvelles recherches, le phénomène de l'induction axiale qui, à première vue, se présente dans des conditions plus générales

et contenant des éléments peut-être encore inconnus.

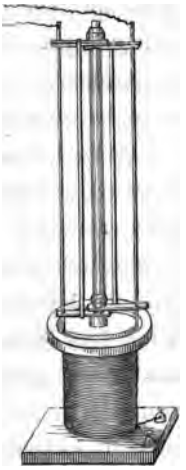
Dans ce but, j'ai tenté les expériences que je vais vous montrer, en suivant l'ordre même dans lequel elles ont été exécutées.

Ire. — Voici un électro-aimant que je dispose avec son axe vertical; je fais tourner une tige cylindrique de cuivre, de 8 millimètres d'épaisseur, autour de son axe qui coïncide avec celui de l'électro-aimant; une extrémité de cette tige est très-rapprochée du pôle, et l'autre en est éloignée de 30 à 40 centimètres. En appliquant les extrémités du galvanomètre, autant que possible, sur les centres des bases de la tige, on n'a pas de courants induits; mais pour peu qu'on s'éloigne de ces points avec l'une ou avec l'autre des extrémités du galvanomètre ou avec toutes les deux à la fois, on a bientôt les courants induits qui varient de direction suivant le nom du pôle inducteur et le sens de la rotation de la tige. Pour augmenter ces courants, je fixe deux disques de cuivre aux extrémités de la tige, et je touche, avec une extrémité du galvanomètre, un point quelconque du disque placé à une plus grande distance du pôle, et avec l'autre des points du second disque de plus en plus éloignés du centre.

IIe. — Je place dans le prolongement de l'axe de l'électro-aimant un tube de cuivre qui contient dans son intérieur un fil du même métal bien isolé du tube; chacune des extrémités de ces conducteurs se termine, comme dans les appareils d'Ampère, par une capsule pleine de mercure. On fait communiquer les bouts inférieurs du tube et du fil de cuivre avec les extrémités du galvanomètre, et l'on réunit les deux capsules avec un arc de cuivre d'une forme quelconque qui s'approche plus ou moins de l'aimant et dont les deux extrémités viennent ainsi se ter-

miner dans l'axe de l'aimant. En donnant à ce conducteur un mouvement de rotation dans une direction quelconque, il n'y a pas d'induction.

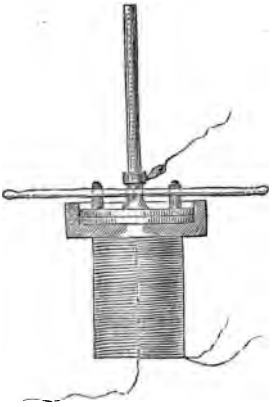
IIIe. — Je dispose sur le pôle de l'électro-aimant un disque de cuivre amalgamé ou bien un disque de bois ayant au bord un anneau circulaire de cuivre ou un canal de la même forme rempli de mercure. Une tige de bois est fixée dans l'axe de l'électro-aimant et s'élève à $0^m,50$ du pôle; cette tige porte près de ses extrémités deux bras horizontaux, de la même longueur, à l'aide desquels je puis faire tourner dans un cercle, dont le centre est dans l'axe magnétique, deux tiges verticales de cuivre; chacune de ces tiges communique en bas avec le disque de cuivre ou avec l'anneau de mercure, et en haut avec les extrémités du galvanomètre. Je m'assure de la bonne disposition de l'appareil en fermant ou en ouvrant le circuit, ce qui a lieu sans qu'il y ait le moindre indice de courant. Si alors je fais décrire à une des tiges métalliques une demi-circonférence dans le sens des courants du pôle et avec une vitesse communiquée avec la main, tandis que l'autre tige est fixe, j'obtiens un courant induit dirigé dans le mer-



cure de l'extrémité mobile à l'extrémité fixe, comme nous l'avons trouvé dans la première expérience du disque en tenant cette dernière extrémité sur le centre de celui-ci. Si le mouvement de la tige est en sens contraire ou si on renverse le pôle, le courant induit est aussi de sens opposé. En faisant mouvoir les deux tiges en même temps et dans le même sens, on n'a plus de courant induit, tandis que ce courant est double d'intensité si l'on fait décrire à chacune des deux tiges une demi-circonférence en sens contraire. En plaçant des fils de cuivre qui réunissent diamétralement en différents points le canal de mercure, le courant reste le même, et en substituant au canal de mercure un disque métallique entier, les phénomènes ne varient pas. Si je fais terminer chacune de ces tiges par un petit fil de cuivre, et si je tiens ce fil qui établit la communication avec le disque, dans des positions différentes, les résultats restent les mêmes.

IV°. — Un tube de cuivre de 60 millimètres de diamètre, fermé à une de ses bases, plonge avec son bord dans le canal circulaire de mercure que nous venons de décrire. Une extrémité du galvanomètre communique avec un point quelconque de ce cylindre, et l'autre avec le mercure. En faisant tourner le tube de cuivre dans le canal de mercure, c'est-à-dire autour de l'axe de l'aimant, on a des courants induits comme dans les expériences précédentes. Les résultats restent les mêmes si on remplace l'anneau de mercure par un anneau de lame de cuivre ou par un disque métallique. Je remarquerai qu'en employant le canal de mercure, les courants sont moins forts, lorsqu'en faisant mouvoir le tube de cuivre, on communique au mercure un mouvement trop grand dans le même sens, ce qui altère

nécessairement la condition essentielle de l'expérience.



V°. — Je place sur le pôle de l'électro-aimant un disque de cuivre de 5 ou 6 millimètres d'épaisseur, dont le centre coïncide avec l'axe magnétique, et sur lequel je pose un autre disque semblable; ces deux disques, qui sont ceux d'un condensateur, ont les surfaces, qui viennent en contact, parfaitement planes et polies, de sorte qu'ils adhèrent avec force. J'ai soin d'amalgamer ces surfaces sans laisser le moindre excès de mercure liquide. Les deux disques sont contenus dans une cavité cylindrique de bois afin de pouvoir faire glisser en rond et autour de l'axe le disque supérieur qui reste en même temps en contact avec le disque inférieur. Une des extrémités du galvanomètre entre par l'axe de l'aimant et arrive au centre du disque inférieur où elle est soudée, et l'autre extrémité communique avec un ressort qui est en contact avec l'axe métallique du disque supérieur. Après s'être assuré qu'il n'y a pas de courant induit en fermant ou en ouvrant le circuit, ni de courant thermo-électrique, je fais tourner le disque supérieur et j'obtiens immédiatement un courant induit dont le sens se renverse en changeant de pôle ou en faisant mouvoir le disque en sens contraire; si le disque supérieur tourne dans le sens des courants du pôle, le courant in-

duit est dirigé à travers les surfaces de contact du disque tournant au disque immobile. Lorsqu'on fait tourner les deux disques en même temps et en sens contraire, l'intensité du courant induit est deux fois plus grande ; au contraire, il n'y a pas de courant si les deux disques tournent dans le même sens et avec la même vitesse. Remarquons de nouveau que si on laisse du mercure liquide entre les deux surfaces, le courant induit diminue à cause du mercure entraîné par le disque mobile. Il faut encore noter que les courants obtenus dans ces expériences ont à peu près la même intensité que ceux obtenus dans les expériences précédentes.

VI°. — Je répète l'expérience de Faraday sur l'aimant cylindrique tournant (*fig.* 11) ; mais, au lieu d'avoir des ressorts qui s'appuient sur les anneaux métalliques du pôle et de l'équateur, je dispose les communications galvanométriques de la manière suivante : un fil de cuivre, de plusieurs mètres de longueur, bien couvert de soie, est plié à moitié et les deux bouts réunis communiquent avec une extrémité du galvanomètre, tandis que le milieu du fil mis à découvert est soudé sur un des anneaux métalliques de l'aimant. On dispose également l'autre communication avec le galvanomètre. Lorsqu'on fait tourner l'aimant, le fil s'enroule et forme deux spirales très-rapprochées et opposées l'une à l'autre, comme dans l'inductionomètre différentiel. De cette manière on n'a pas à craindre que des courants induits se développent au moment où ces spirales se forment ou se déroulent. Je suis parvenu ainsi à répéter l'expérience de Faraday, avec les mêmes résultats, sans que les points de contact entre les extrémités du galvanomètre et la surface de l'aimant viennent à changer.

VII°. J'ai disposé un disque de cuivre de manière à le faire tourner autour de son centre : au travers de celui-ci, je fais passer normalement l'axe d'un gros solénoïde qui est parcouru par un courant voltaïque. Ce disque, qui a à peu près le diamètre de la spirale intérieure, peut être fixe ou immédiatement à l'extérieur du solénoïde ou dans son intérieur à une profondeur différente. En donnant au disque une certaine rotation et en appliquant sur deux points déterminés de sa surface, tels que le centre et le bord, les extrémités du galvanomètre, on a un courant induit dont la direction est la même dans toutes les positions du disque, mais dont l'intensité augmente notablement en passant des extrémités vers le milieu du solénoïde. On sait qu'on obtient un résultat semblable en observant la rotation d'un courant radial.

Si au [illegible] disque métallique j'en dispose deux qui [illegible] dans l'intérieur du solénoïde [illegible] au milieu du solénoïde et [illegible] on obtient encore un courant [illegible] temps avec les deux extrémités [illegible] les deux disques dans des points [illegible] : la direction du courant [illegible] en portant en contact du [illegible] extrémité du galvanomètre [illegible] disque.

[illegible] a décrit, de l'in[illegible] dans l'induction [illegible] extrémités, explique [illegible] dans laquelle [illegible] cylindrique autour de [illegible].

Ayant placé dans l'intérieur du solénoïde un cylindre creux de fer doux qui était beaucoup plus court que le solénoïde, le courant induit obtenu sur le disque tournant était toujours de la même direction, mais l'intensité la plus grande a été trouvée cette fois aux extrémités du solénoïde et la plus petite au milieu. Ce résultat, qu'il aurait été convenable de pouvoir vérifier avec un cylindre de fer doux de la même longueur que le solénoïde, ne correspond pas à celui obtenu en étudiant la rotation électromagnétique du mercure ou d'un fil radial dans les mêmes circonstances.

VIII°. — J'ai placé le grand disque de lame d'étain ou de cuivre (*fig.* 14) très-près d'une des extrémités d'un solénoïde dont l'axe horizontal était perpendiculaire au disque et passait par son centre. Le diamètre du disque était plus que quadruple de celui du solénoïde. Je fais passer un courant voltaïque très-fort dans le solénoïde, et j'applique les extrémités du galvanomètre sur les différents points du disque, auquel on donne un mouvement uniforme de rotation. En tenant une de ces extrémités fixe au centre et portant l'autre en contact des points de plus en plus éloignés jusqu'au bord, le courant induit, qui a partout la même direction, augmente d'intensité à mesure que la distance entre les extrémités du galvanomètre devient plus grande. Ce résultat a lieu, soit en restant toujours sur le même rayon avec l'extrémité qu'on fait mouvoir, soit en portant celle-ci sur des rayons différents. Si l'on tient l'extrémité du galvanomètre, celle qui était mobile auparavant, fixe sur le bord du disque, et si, successivement, l'on se rapproche avec l'autre au centre, on trouve d'abord un courant qui, quoique beaucoup plus faible que les courants précédemment obtenus, est constam-

VIIe. — J'ai disposé un disque de cuivre de manière à le faire tourner autour de son centre ; au travers de celui-ci, je fais passer normalement l'axe d'un gros solénoïde qui est parcouru par un courant voltaïque. Ce disque, qui a à peu près le diamètre de la spirale intérieure, peut être fixé ou immédiatement à l'extérieur du solénoïde ou dans son intérieur à une profondeur différente. En donnant au disque une certaine rotation et en appliquant sur deux points déterminés de sa surface, tels que le centre et le bord, les extrémités du galvanomètre, on a un courant induit dont la direction est la même dans toutes les positions du disque, mais dont l'intensité augmente notablement en passant des extrémités vers le milieu du solénoïde. On sait qu'on obtient un résultat semblable en observant la rotation d'un courant radial.

Si, au lieu d'un seul disque métallique j'en dispose deux qui tournent autour du même axe dans l'intérieur du solénoïde, dont l'un est placé au milieu du solénoïde et l'autre à une des extrémités, on obtient encore un courant induit en touchant en même temps avec les deux extrémités du galvanomètre les deux disques dans des points également éloignés de leurs centres ; la direction du courant est telle qu'on l'aurait trouvé en portant, en contact du centre du disque du milieu, l'extrémité du galvanomètre qui était appliquée sur l'autre disque.

Ce résultat, conforme à celui qu'on a décrit, de l'intensité beaucoup plus grande, trouvée dans l'induction axiale au milieu du solénoïde, qu'aux extrémités, explique l'expérience que nous avons déjà décrite, dans laquelle Faraday a fait tourner un aimant cylindrique autour de son propre axe.

Ayant placé dans l'intérieur du solénoïde un cylindre creux de fer doux qui était beaucoup plus court que le solénoïde, le courant induit obtenu sur le disque tournant était toujours de la même direction, mais l'intensité la plus grande a été trouvée cette fois aux extrémités du solénoïde et la plus petite au milieu. Ce résultat, qu'il aurait été convenable de pouvoir vérifier avec un cylindre de fer doux de la même longueur que le solénoïde, ne correspond pas à celui obtenu en étudiant la rotation électromagnétique du mercure ou d'un fil radial dans les mêmes circonstances.

VIII°. — J'ai placé le grand disque de lame d'étain ou de cuivre (*fig.* 14) très-près d'une des extrémités d'un solénoïde dont l'axe horizontal était perpendiculaire au disque et passait par son centre. Le diamètre du disque était plus que quadruple de celui du solénoïde. Je fais passer un courant voltaïque très-fort dans le solénoïde, et j'applique les extrémités du galvanomètre sur les différents points du disque, auquel on donne un mouvement uniforme de rotation. En tenant une de ces extrémités fixe au centre et portant l'autre en contact des points de plus en plus éloignés jusqu'au bord, le courant induit, qui a partout la même direction, augmente d'intensité à mesure que la distance entre les extrémités du galvanomètre devient plus grande. Ce résultat a lieu, soit en restant toujours sur le même rayon avec l'extrémité qu'on fait mouvoir, soit en portant celle-ci sur des rayons différents. Si l'on tient l'extrémité du galvanomètre, celle qui était mobile auparavant, fixe sur le bord du disque, et si, successivement, l'on se rapproche avec l'autre au centre, on trouve d'abord un courant qui, quoique beaucoup plus faible que les courants précédemment obtenus, est constam-

ment dirigé en sens contraire. En se rapprochant encore du centre et à peu près vers la moitié du rayon du disque, on ne trouve pas de courants induits. En continuant toujours à aller vers le centre, les courants induits reparaissent, dirigés comme ceux qu'on trouve entre le centre et le bord du disque et avec des intensités qui croissent rapidement. Il mérite d'être remarqué que la direction des courants induits est la même entre le centre et le bord, comme entre le centre et des points placés, soit en dedans, soit en dehors, et même à une grande distance de la projection de la spirale. En ayant un cylindre de fer doux dans le solénoïde, on obtient les mêmes phénomènes d'induction, mais avec une intensité beaucoup plus grande.

Nous verrons dans la prochaine leçon sur les courants induits dans le disque tournant d'Arago, comment on peut interpréter les résultats de ces expériences sur l'induction axiale en imaginant que le disque tournant en face du solénoïde est séparé en deux régions concentriques sur lesquelles l'induction développe des états électriques contraires.

Lorsqu'on réfléchit à la disposition des différentes parties du conducteur induit dans les expériences rapportées sur l'induction axiale, et principalement aux résultats obtenus dans les expériences V, VI et VIII, on doit avouer que cette induction peut s'obtenir sans réaliser les conditions dans lesquelles la rotation magnétique a lieu, et que, dans quelques cas, les deux phénomènes, c'est-à-dire la rotation électromagnétique et l'induction axiale, cessent de se correspondre.

Tâchons de nous résumer en quelques propositions qui embrassent tous les phénomènes de l'induction.

1re. — Lorsqu'un conducteur filiforme ou une masse mé-

tallique d'une forme quelconque sont placés dans la sphère d'action d'un conducteur voltaïque ou d'un électro-aimant temporaire, il y a des forces électromotrices induites dans les éléments de cette masse au moment qu'on fait passer ou cesser le courant; ces forces électromotrices qui emploient un temps fini, quoique très-court pour se développer et se neutraliser, donnent lieu à des courants dont les propriétés dépendent des lois de la propagation de l'électricité dans la masse induite et de la vitesse avec laquelle a lieu la variation de la force inductrice. Il est naturel d'admettre que l'induction puisse se développer dans un circuit ouvert en donnant lieu à des phénomènes de tension électrique.

2e. — Ces mêmes phénomènes d'induction se produisent lorsqu'une partie d'un circuit métallique fermé est approchée ou éloignée d'un aimant ou d'un courant voltaïque en traversant dans ce mouvement les lignes magnétiques. On peut rendre permanents les phénomènes de l'induction en faisant, à l'aide d'un mouvement de rotation, varier successivement la distance entre les différents points de la masse métallique induite et l'aimant inducteur; on atteint le maximum de l'induction lorsqu'on donne à l'aimant et à la masse induite la même vitesse, mais en sens contraire, c'est-à-dire lorsque la variation relative est la plus grande possible. Comme la vitesse de rotation de la masse métallique est toujours très-petite en comparaison de celle avec laquelle les forces électromotrices induites se neutralisent, on conçoit que les *états électriques induits* persisteront dans les mêmes points de l'espace relativement à l'aimant, quoique successivement excités et neutralisés dans les différents points matériels du disque.

On peut passer de l'induction dans les circuits filiformes à l'induction du disque tournant en présence de l'aimant, en considérant la partie radiale du disque qui est immédiatement sujette à l'induction comme faisant partie d'un grand nombre de circuits représentés par le reste du disque.

3e. — Il y a encore induction dans une masse métallique formée de deux parties qui sont en contact dans certains points et communiquent par d'autres avec les extrémités du circuit galvanométrique, lorsque, sans faire varier la distance absolue entre l'aimant inducteur et tous les points de cette masse et en tenant fixes les communications avec le galvanomètre, on renouvelle les points de contact de ces deux parties. Dans ce cas aussi, la force électromotrice induite dépend de la vitesse relative avec laquelle les points de contact se renouvellent. La direction des courants induits varie, comme dans tous les phénomènes d'induction, suivant le nom du pôle inducteur et le sens du mouvement relatif des parties induites; dans le plus grand nombre de cas l'induction axiale s'accorde avec la rotation électromagnétique suivant la loi de Lenz.

4e. — Il n'y a pas d'induction dans une masse métallique d'une forme quelconque fixée extérieurement à l'aimant inducteur, si celui-ci ne fait que tourner autour de son axe.

Après avoir résumé en quelques propositions générales les différents cas de l'induction, il resterait à savoir de quelle manière il faut interpréter l'induction axiale.

Faut-il considérer cette induction axiale comme dépendante des principes établis pour les autres cas, en se fondant sur la forme variable du corps induit et sur les circuits différents qui se renouvellent à chaque instant par le mouvement relatif des parties de ce corps? Quelle est

la signification physique de la relation trouvée entre l'induction axiale et la rotation électromagnétique? Faut-il attribuer cette induction à un état électromoléculaire nouveau que l'aimant développe dans les corps soumis à son influence et qui est variable avec le mouvement? Nous devons avouer que l'état de la science n'est pas encore assez avancé pour donner à ces questions une réponse satisfaisante; à la fin de ce cours nous exposerons sur ce sujet quelques vues hypothétiques.

Je n'achèverai pas cette leçon sans dire quelques mots sur les *lignes* ou *courbes de force magnétique*, et sur le rôle que Faraday attribue à ces lignes dans les phénomènes de l'induction.

Lorsqu'on se représente toutes les découvertes si remarquables faites depuis un quart de siècle par Faraday, il faut admettre, comme il le dit lui-même, que l'idée de ces lignes et de leurs propriétés a exercé une influence bien féconde sur le génie inventif de cet expérimentateur. Nous reviendrons dans la suite de ce cours sur ces lignes, et nous aurons de fréquentes occasions de reconnaître tout l'avantage qu'on retire pour l'étude des propriétés de l'aimant, en ayant devant les yeux des feuilles de papier sur lesquelles sont tracées les lignes de force magnétique des aimants ou des électro-aimants qu'on emploie, prises à des hauteurs et dans des positions différentes et telles qu'on les a avec la limaille de fer. Tout le monde sait que ces lignes, dont la connaissance est aussi ancienne que celle de l'aimant, sont tracées par les directions suivant lesquelles des grains de fer doux répandus uniformément sur une feuille de papier se réunissent entre eux en face des pôles d'un aimant.

Faraday formule sa découverte de l'induction en ces

termes : il n'y a jamais de courant induit dans un fil conducteur qui se meut suivant une ligne de force magnétique, tandis que le courant se développe lorsque ce fil se meut à travers cette ligne dans une direction quelconque; la direction du courant induit dépend de celle des lignes traversées suivant le pôle auquel elles appartiennent et du sens dans lequel les lignes du même pôle sont traversées par le fil; une section donnée de ces lignes représente une somme constante de force inductrice; le courant induit est développé dans un circuit qui se meut à travers des lignes de la même force magnétique suivant que, par le mouvement contraire des différentes parties du circuit, ou par un mouvement inégal dans le même sens, ou par une vitesse angulaire différente, une partie du circuit coupe plus ou moins de lignes qu'une autre.

Cette formule comprend tous les phénomènes de l'induction et s'accorde dans le plus grand nombre de points avec la définition géométrique qu'on donne de ces courbes en partant des forces polaires et de l'induction magnétique proprement dite. Faraday est obligé en outre d'attribuer une propriété nouvelle à ces courbes, qui est celle de leur *polarité transversale*. Cette nouvelle propriété explique, il est vrai, l'induction axiale, mais elle n'a jusqu'ici d'autre preuve que le phénomène même pour lequel on l'a imaginé.

A ce sujet, nous ne pouvons que répéter ce que nous avons déjà dit sur l'induction axiale, c'est-à-dire que de nouvelles recherches seules décideront si cette induction n'est qu'un cas plus compliqué, mais de la même nature, de l'induction dans les conducteurs filiformes, ou, ce qui paraîtrait plus probable, si elle contient un principe nouveau.

Faraday, qui dans ses Mémoires se sert à chaque instant du mot *line of force*, a bien soin de faire remarquer la différence qu'il y a entre ce mot comme simple expression de la distribution des forces magnétiques autour de l'aimant, et une autre signification qu'on pourrait lui donner et qui serait celle du *physical mode* de la transmission de ces forces. J'attendrai d'avoir parlé dans ce cours des propriétés des corps diamagnétiques et des relations entre les forces moléculaires et celles de l'aimant pour vous exposer quelques vues générales et encore hypothétiques qui pourraient s'appliquer à cette nouvelle signification des lignes de force magnétique.

TROISIÈME LEÇON

Magnétisme par rotation. — Détermination des courants induits sur le disque d'Arago, et explication des forces qui s'exercent entre ce disque et l'aiguille aimantée. — Réaction des courants induits sur les forces inductrices.

Je vous ai montré dans la leçon précédente l'expérience qui prouve le développement des courants induits dans une masse métallique, lorsqu'elle se meut en présence d'un aimant. Je vous ai aussi fait remarquer qu'on pouvait se représenter ces courants comme formant deux systèmes fermés et symétriques à droite et à gauche du pôle inducteur, semblables aux deux extrémités d'un solénoïde. En partant de cette idée, nous pouvons concevoir comment ces systèmes électrodynamiques développés par l'induction, réagissent sur l'aimant. C'est dans cette réaction que nous chercherons l'explication du magnétisme par rotation, après en avoir exposé les phénomènes et les lois principales.

Dans la séance de l'Académie des Sciences du 22 novembre 1824, Arago communiqua la découverte de l'influence que les métaux et quelques autres substances exercent sur l'aiguille aimantée pour diminuer l'amplitude de son oscillation sans en altérer sensiblement la durée.

Il est facile de vous montrer l'expérience fondamentale d'Arago. Voici un barreau aimanté suspendu horizontalement, que j'écarte de sa position naturelle et que j'abandonne ensuite à lui-même. Je fixe avec le fil du micromètre d'une lunette le degré 60 du cadran sur lequel l'aiguille oscille, et j'attends qu'elle arrive à ce degré pour commencer à compter les oscillations : je trouve que l'aiguille a fait 175 oscillations pour descendre de 60 à 20 degrés. Je répète la même expérience, après avoir placé sous l'aiguille un disque de lame de cuivre à la distance de 10 millimètres, et je trouve que les oscillations se réduisent à 38 pour descendre du même arc, et à 22 oscillations en tenant l'aiguille à la distance de 2 millimètres du disque.

Je puis vous montrer des phénomènes semblables, mais encore plus frappants, en faisant osciller entre les pôles contraires d'un électro-aimant, un disque de cuivre suspendu comme le fléau d'une balance. Si le circuit n'est pas fermé, le disque, dévié d'un certain arc et abandonné à lui-même, fait un grand nombre d'oscillations avant de s'arrêter. En répétant l'expérience après avoir fermé le circuit, le disque ne fait plus que deux ou trois oscillations et s'arrête bientôt : au contraire, si les pôles sont de même nom, le nombre des oscillations est à peu près le même qu'il était avant que le circuit fût fermé.

Une action si puissante entre une masse métallique et un aimant en mouvement devait faire une grande impression sur l'esprit sévère d'Arago, qui savait que cette action est nulle ou très-faible quand l'aimant est en repos. De là la résistance que ce grand physicien opposa, dès le commencement, à expliquer ces phénomènes par l'induction magnétique ordinaire. Pour dissiper les doutes, il aurait suffi de remplacer le disque de cuivre par un dis-

que de fer ou d'une matière ferrugineuse quelconque ; avec un tel disque suspendu entre les pôles contraires d'un aimant, les oscillations deviennent plus rapides, et leur nombre pour descendre d'un certain arc est plus grand qu'entre les pôles de même nom.

Arago ne s'était pas trompé dans sa réserve, et, en effet, dans la séance du 7 mars 1825, il présentait à l'Académie un appareil qui montrait sous une forme nouvelle, l'action développée entre l'aiguille aimantée et les métaux non magnétiques en mouvement. Puisqu'une aiguille qui oscille est arrêtée par une plaque de métal en repos, Arago pensa qu'une aiguille en repos devait éprouver une certaine action de cette plaque en mouvement.

L'appareil dont il s'est servi pour vérifier cette idée consiste en un simple *mouvement d'horlogerie*, destiné à imprimer une rotation rapide à un axe vertical. A l'aide d'un volant on peut donner des vitesses différentes à cet axe et au disque de cuivre qu'il porte ; un compteur, mis en communication avec l'axe, indique le nombre de tours que fait le disque dans l'unité de temps. Pour bien disposer l'expérience, on doit suspendre l'aiguille dans une cloche indépendante du mouvement d'horlogerie et interposer entre le disque et l'aiguille aimantée une feuille de papier ou plutôt une lame de verre, afin que l'aiguille ne soit pas agitée par les courants d'air et par les vibrations de l'axe tournant.

Lorsque la rotation du disque commence, on voit immédiatement l'aiguille dévier dans le sens du mouvement du disque, comme si elle tendait à le suivre ; si la vitesse de rotation est uniforme, l'aiguille, après quelques oscillations, s'arrête en faisant un certain angle avec le méridien magnétique. A mesure que le mouvement du disque de-

vient plus rapide, l'angle de déviation de l'aiguille augmente, et dès qu'elle est parvenue au point où l'action de la terre cesse de la solliciter à retourner à sa position d'équilibre, l'aiguille prend un mouvement continu de rotation.

On peut renverser la disposition de l'expérience en mettant l'aimant en rotation, ce qui permet d'obtenir des effets plus intenses et qu'on est libre d'augmenter, en employant des aimants d'une plus grande force.

L'appareil que j'ai employé dans mes expériences consiste (*fig.* 12) en deux électro-aimants cylindriques fixés verticalement à une lame de fer doux avec leurs pôles opposés du même côté. Les cylindres ont 12 millimètres de diamètre et leurs axes sont à la distance de 24 millimètres. L'électro-aimant ainsi formé tourne autour d'un axe qui coupe à moitié la ligne polaire et qui est dans le prolongement du fil auquel on suspend le corps soumis à l'action magnétique. L'appareil qui fait tourner l'électro-aimant est indépendant du fil et de son point de suspension, de manière à éviter les effets des vibrations et de l'agitation de l'air produites par la rotation de l'électro-aimant. Le commutateur porté par l'axe de rotation, qui sert à faire passer le courant de la pile dans les bobines de l'électro-aimant, doit être construit avec soin pour être sûr que les contacts restent constants pendant la rotation. Cet électro-aimant était mis en activité par 6 ou 8 éléments de Grove, et une boussole de tangentes était dans le circuit pour s'assurer de la force du courant. Dans quelques expériences, j'ai fait tourner un gros électro-aimant en le montant de la manière que je viens de décrire sur l'axe de la machine de Savart. Je dois à l'amitié de M. Breguet d'avoir maintenant un appareil de rotation à l'aide duquel je puis faire tourner un gros électro-aimant centré au-

tour de l'axe de rotation avec des vitesses uniformes.

Avant de vous exposer les lois de la force nouvelle découverte par Arago, je décrirai les méthodes avec lesquelles on peut la mesurer.

La première de ces méthodes, suivie par Arago, consiste à compter le nombre des oscillations d'un barreau aimanté suspendu horizontalement sur les différents corps dont on veut étudier l'influence. A cet effet, après avoir écarté l'aiguille de sa position naturelle, on l'abandonne à elle-même, on commence à compter les oscillations dans le moment où l'axe de l'aiguille tombe sur un certain degré du cadran et l'on s'arrête lorsque cet axe coïncide avec un autre degré plus près du zéro. On a ainsi le nombre des oscillations que l'aiguille a faites pendant que l'amplitude de son mouvement autour du méridien magnétique a diminué d'un certain arc. Si l'on fait cette expérience en tenant le barreau à la même hauteur sur des disques métalliques différents, ou si l'on fait varier la distance entre le barreau et ces disques, on trouve des nombres différents d'oscillations. Pour appliquer ces résultats à la mesure des forces qui agissent sur l'aiguille, il faut se rappeler que la durée de ses oscillations reste sensiblement la même dans tous les cas et interpréter ces effets différemment de ce qu'on ferait si l'aiguille oscillait en présence d'un corps susceptible de l'induction magnétique ordinaire. Il était important de vérifier si la durée de l'oscillation d'un gros cylindre de cuivre restait la même en le faisant osciller horizontalement entre les pôles d'un électro-aimant. On sait que les mouvements de ce barreau s'arrêtent bientôt, de sorte qu'il faut le suspendre à un fil métallique ayant la torsion suffisante pour l'obliger à faire un certain nombre d'oscillations. J'ai trouvé que la durée

de l'oscillation du barreau de cuivre, quelles que fussent sa forme et son épaisseur, n'était pas sensiblement altérée par l'action d'une force magnétique très-grande et capable de l'arrêter brusquement lorsqu'il est suspendu à un fil de soie.

Pour compléter cette méthode des oscillations, que nous verrons ensuite être propre à faire découvrir des actions très-faibles, il faudrait savoir évaluer les forces qui font diminuer différemment l'amplitude des oscillations d'une aiguille sans en altérer la durée. Je me borne ici à vous annoncer le résultat d'une expérience sur laquelle nous reviendrons encore, et qui aurait dû être étudiée et variée plus longuement que je n'ai pu le faire. Si l'on fait osciller une aiguille horizontale, dont l'axe est à une égale distance des surfaces internes des deux disques de cuivre semblables, et si cette distance est petite, le nombre des oscillations que l'aiguille fait pour descendre d'un certain arc, réduit très-petit, est sensiblement la moitié du nombre des oscillations qu'elle fait en présence d'un seul de ces disques. Comme la force qui agit pour retarder l'aiguille est certainement double avec les deux disques, il en résulterait que, dans ce cas, les forces sont réciproquement proportionnelles aux nombres des oscillations. En augmentant la distance des deux disques ou en employant des métaux d'une action plus faible que celle du cuivre, ce résultat n'a plus lieu, et on trouve que le nombre des oscillations faites entre les deux disques est plus grand que la moitié de celui qui corresponde à un disque seul.

Lorsque le corps sur lequel on fait osciller l'aiguille a une action très-faible, tel que le verre, l'eau, l'eau gelée, etc., il faut tenir l'aiguille très-près de sa surface. M. Harris a imaginé d'opérer dans l'air à un certain degré de raréfaction, afin de rendre plus grandes les différences

qui doivent manifester l'influence des corps soumis à l'aimant et d'exclure l'effet variable de la résistance de la couche très-mince d'air interposée. Il est à craindre que la difficulté de conserver constant le degré de raréfaction de l'air diminue l'avantage de ce procédé et augmente l'incertitude des résultats. Il paraît que M. Arago avait eu l'idée de déterminer l'influence de la couche d'air sur l'amplitude des oscillations d'une aiguille, en employant dans les mêmes circonstances une aiguille de cuivre ou d'un corps non magnétique quelconque.

Une autre méthode pour mesurer la force avec laquelle le disque métallique tournant entraîne l'aiguille aimantée, est fondée sur la détermination de l'angle de déviation auquel s'arrête l'aiguille après avoir donné à ce disque un mouvement uniforme de rotation. Il est clair qu'en faisant varier dans ces expériences le métal du disque ou les distances entre l'aiguille et le disque, pourvu que le mouvement de rotation soit le même, les forces développées seront proportionnelles au sinus des angles de déviation. Malheureusement, dans cette méthode, les effets sont limités par la force magnétique de l'aiguille, et l'on ne peut l'appliquer que dans les cas d'actions très-énergiques.

Dans mes dernières recherches sur les phénomènes du magnétisme par rotation, j'ai souvent employé, pour mesurer la force tangentielle développée par l'électro-aimant tournant, la balance de torsion de Coulomb. Le corps soumis à l'électro-aimant est suspendu, à des distances variables des pôles, à un fil d'argent dont le prolongement coupe la ligne polaire à moitié. Le corps suspendu sur l'aimant est plongé dans de l'eau contenue dans une boîte carrée de cristal, afin d'arrêter plus tôt les oscillations. En donnant à l'électro-aimant un mouvement uniforme de

rotation, on voit le corps s'arrêter à un certain angle de déviation; on tourne alors le micromètre en sens contraire et l'on reconduit le corps suspendu à sa position primitive, en observant la coïncidence d'un point déterminé de sa surface avec le fil micrométrique d'une lunette. Dans le plus grand nombre de mes expériences, j'ai employé un fil d'argent qui avait 1 mètre de longueur et qui pesait 65 milligrammes : le nombre de tours de l'électro-aimant a été de quatre à cinq par seconde.

J'ai été souvent obligé d'opérer sur des corps qui n'éprouvaient que très-faiblement l'action de l'aimant tournant. Je suspendais ces corps réduits en forme de sphères ou de disques à un fil de cocon et je faisais tourner l'électro-aimant. En observant avec une lunette des traits en couleur qu'on avait faits sur le bord du disque, et après s'être assuré qu'il n'y avait aucun mouvement excité malgré la rotation de l'électro-aimant, je fermais le circuit, et au même moment on commençait à compter les secondes avec un chronomètre à pointage à la main.

Si le corps est susceptible du *magnétisme par rotation*, on le verra tourner dans le sens de l'électro-aimant, d'abord très-lentement, et peu à peu avec une vitesse qui pour un certain nombre de tours augmente uniformément. En supposant que ces premières révolutions du disque soient faites avec un mouvement uniformément accéléré, comme il est approximativement prouvé par l'expérience, on pourra mesurer les forces accélératrices par la formule $\frac{S}{t^2}$, pourvu qu'on compare dans chaque expérience la durée de la première, de la seconde, etc., de ces révolutions.

Une condition essentielle pour que le expériences faites avec cette méthode soient comparables, est celle d'employer

des fils de cocon aussi semblables que possible. Il existe parmi ces fils des différences très-grandes; j'en ai trouvé, et surtout dans les couches externes du cocon, qui étaient rompus par un poids de 3 à 4 grammes, et d'autres internes qui résistaient à 18 ou 20 grammes. Si l'on emploie des fils différents pour soutenir le même corps soumis à l'aimant tournant, on trouve aussi des différences très-grandes dans la durée des révolutions. J'ai employé constamment un fil simple, obtenu en dédoublant le fil qu'on tire du cocon; la longueur de ce fil simple était de 1 mètre, le poids du corps suspendu à son extrémité n'a jamais été au delà de 1^{gr},500, et le poids qui le rompait était de 7 à 8 grammes.

En notant la durée des différentes révolutions d'un corps qui est suspendu au fil de cocon sous l'influence de l'électro-aimant tournant, j'ai trouvé qu'après quelques révolutions, qui dénotent un mouvement uniformément accéléré, il y en a plusieurs d'une vitesse sensiblement uniforme, suivies par quelques révolutions de plus en plus lentes; lorsque le corps a ainsi cessé de tourner dans le sens de l'électro-aimant, il recommence en sens contraire en passant par les mêmes périodes de vitesse, et se fixe à la fin en ayant son fil de suspension qui reste tordu de plusieurs tours dans le sens primitif. Parmi les causes qui tendent à rendre uniforme le mouvement développé par l'action de l'électro-aimant tournant, il faut compter principalement l'effet de ce mouvement sur la cause de l'induction, qui est d'autant plus grand que la rotation du corps devient plus rapide; nous savons que cette cause cesserait d'agir si l'électro-aimant et le corps se mouvaient dans le même sens avec la même vitesse.

Toutes les fois que le nombre de révolutions faites avec

une vitesse uniforme est assez grand et qu'on peut en déterminer la durée avec précision, on trouve que les forces, connues et déterminées avec la torsion, sont réciproquement proportionnelles aux durées de ces révolutions.

Nous devons passer maintenant à étudier la nature et les lois principales de la force découverte par Arago.

L'action qu'un disque métallique horizontal et tournant sur son centre exerce sur l'un des pôles d'une aiguille aimantée peut être décomposée en trois forces : la première, verticale ou perpendiculaire au disque ; la seconde, horizontale et perpendiculaire au plan vertical qui contient le rayon aboutissant à la projection du pôle de l'aiguille ; la troisième, dirigée parallèlement au même rayon. Voici comment Arago a fait les expériences qui prouvent l'existence de ces forces et donnent le sens dans lequel elles agissent.

Le mouvement de l'aiguille horizontale entraînée par le disque tournant est dû à la force tangentielle qui agit perpendiculairement au rayon du disque : nous avons déjà appris à mesurer les effets de cette force.

Pour démontrer l'existence de la composante perpendiculaire au disque, Arago a suspendu un long barreau aimanté avec son axe vertical à une des extrémités du fléau d'une balance qui était maintenue en équilibre à l'aide d'un poids placé à l'autre extrémité. En faisant tourner un disque de cuivre sous l'aimant, celui-ci était soulevé et comme repoussé par le disque. Ce resultat a lieu pour tous les points du disque et peut être vérifié à l'aide d'une aiguille d'inclinaison qu'on tient verticalement et avec un de ses pôles très-rapproché du disque ; pendant la rotation, l'aiguille est constamment repoussée du disque. En employant l'électro-aimant que j'ai décrit, au-dessus duquel se trouve un disque de cuivre fixé à l'extrémité d'un levier

horizontal très-mobile, on voit ce disque repoussé lorsque l'électro-aimant est mis en rotation. Ces expériences prouvent qu'une force répulsive agit normalement entre chaque point du disque et le pôle de l'aimant.

Pour constater l'existence de la troisième composante qui s'exerce dans le plan des rayons du disque et dans des directions différentes, on place l'aiguille d'inclinaison verticalement et de manière à ce qu'elle ne puisse tourner que dans un plan qui passe par le centre du disque. Lorsque la rotation a lieu, si l'aiguille est près du bord on la voit repoussée en dehors; cette répulsion diminue à mesure qu'on approche l'aiguille du centre, devient nulle à une certaine distance de ce point, et enfin change de signe quand on s'en rapproche davantage. Ainsi, sur chaque rayon du disque il y a un point entre la circonférence et le centre où l'aiguille reste verticale et la force est nulle; au delà de ce point, en allant vers le bord, l'aiguille est *repoussée* en dehors du disque, tandis qu'en portant l'aiguille vers le centre elle est *attirée* vers ce dernier point.

Cette analyse de l'action qui se développe entre une aiguille aimantée et une masse métallique en mouvement, montrait assez l'insuffisance de l'explication qu'on avait essayé d'abord d'en donner en ayant recours à l'induction magnétique ordinaire et à l'influence du temps nécessaire pour que cette induction atteigne son plein développement.

Après avoir appris par la découverte de Faraday, que des courants induits se produisent dans un fil ou dans une masse métallique toutes les fois qu'on fait varier l'action d'un aimant sur les différents points de cette masse, il était naturel de recourir à l'induction pour expliquer les phénomènes du *magnétisme par rotation.*

Il faut déterminer d'abord l'état électrique qui est déve-

loppé par l'induction dans le disque métallique tournant et appliquer ensuite les lois de l'action électro-magnétique pour expliquer les forces découvertes par Arago.

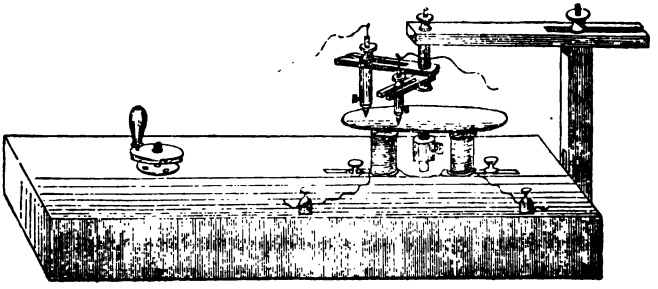
Nous avons vu dans la leçon précédente qu'on trouve des courants électriques dont la direction et l'intensité sont déterminées, en appliquant les extrémités du fil du galvanomètre sur les différents points d'un disque de cuivre qui tourne en présence ou entre les pôles d'un aimant. Nobili et Antinori ont fait, après Faraday, un grand nombre d'expériences sur les courants du disque, et les dessins qu'ils ont publiés pour représenter ces courants ont été généralement admis comme exacts. Faraday, qui est revenu sur le même sujet dans une lettre adressée à Gay-Lussac, très-peu de temps après la publication des Mémoires de Nobili et Antinori, a admis l'exactitude des figures tracées par les physiciens italiens, et a, pour la première fois, émis l'hypothèse que le système électro-dynamique développé dans le disque pouvait être sujet à un déplacement dans le sens de la rotation, causé par l'influence du temps nécessaire au développement de l'induction. Cette hypothèse, que j'ai vérifiée par des expériences rigoureuses, a beaucoup contribué, comme nous le verrons plus tard, à expliquer tous les effets du magnétisme par rotation.

Commençons par décrire l'appareil qu'il est nécessaire d'employer pour déterminer l'état électrique du disque tournant, et dont le défaut a dû être la cause principale de l'incertitude et de l'imperfection des résultats auxquels étaient parvenus les physiciens qui m'ont précédé dans ces recherches.

Cet appareil consiste en un disque de cuivre *d* (*fig.* 14) ou de lame d'étain collée sur un disque de bois, bien centré sur l'axe d'une machine de rotation semblable à celle em-

ployée par Savart dans des expériences très-connues d'acoustique. Dans nos premières recherches, le disque avait $0^m,80$ de diamètre, et un électro-aimant très-fort *a* (*fig.* 10) pesant 100 kilogrammes était couché horizontalement avec ses pôles à quelques millimètres de distance de la surface du disque et à égale distance de son centre. Les expériences réussissent encore mieux lorsqu'on emploie un disque de cuivre, ayant $0^m,20$ de diamètre et $1\frac{1}{2}$ millimètre d'épaisseur, monté sur l'axe de l'appareil décrit dans la leçon précédente (*fig.* 9), et qui peut être centré beaucoup plus exactement que le grand disque.

Dans cette dernière disposition, les électro-aimants formés d'un cylindre de fer de 12 millimètres d'épaisseur sont fixés verticalement sur la table et ont leurs pôles à la distance de 2 à 3 millimètres de la surface inférieure du disque; on mesure les courants du disque en appliquant sur sa surface amalgamée les extrémités, également amalgamées, du fil d'un bon galvanomètre à fil court qui est tenu à une certaine distance de l'appareil, pour qu'il ne ressente pas l'action magnétique. Chacune de ces extrémités est formée d'une tige de cuivre à tête émoussée retenue dans une cavité cylindrique du même métal qui contient un ressort à boudin destiné à pousser la tige contre le disque.



La partie essentielle de l'appareil est celle qui sert à fixer les extrémités du galvanomètre en contact des points déterminés du disque tournant. A cet effet, on visse sur la table de l'appareil un bras en bois portant deux branches parallèles au disque qu'on peut fixer de manière à former des angles différents entre elles : les deux tiges, qu'on fait communiquer avec les extrémités du galvanomètre, peuvent glisser et être fixées avec des écrous dans deux fentes longitudinales pratiquées dans ces branches. On conçoit facilement comment on réussit, avec cet appareil, à maintenir les extrémités du galvanomètre en contact constant avec des points déterminés du disque en rotation.

Je rappellerai d'abord en peu de mots les résultats principaux obtenus par Faraday, et que je vous ai déjà décrits dans la leçon précédente. Dans le cas le mieux étudié, qui est celui d'un disque tournant en face de deux pôles magnétiques contraires placés à égales distances de son centre, Faraday a trouvé des courants électriques qui traversaient le disque suivant la ligne polaire et dans la même direction à droite et à gauche de chaque pôle pour toute la longueur de cette ligne. Ayant supposé que ces courants se déchargeaient latéralement dans les parties du disque où l'induction était faible ou nulle, on a admis l'existence de deux circuits fermés, représentant les extrémités opposées d'un solénoïde.

Passons maintenant aux résultats obtenus avec notre appareil. Je me bornerai à décrire minutieusement les expériences faites avec le disque de $0^{m},20$ de diamètre (*fig.* 15 et 16), au-dessous duquel sont fixées verticalement les deux pôles de nom contraire des deux petits électro-aimants dont les axes se projettent sur le milieu des

rayons *pi* et *ph*. Après avoir fixé avec soin les deux tiges du galvanomètre, en contact avec la surface du disque, on s'assure, avant de faire agir les électro-aimants, qu'il n'y a pas de courant thermo-électrique, tout en donnant au disque une grande vitesse de rotation. Dans le plus grand nombre de mes expériences, cette vitesse n'a été que de quatre à cinq tours par seconde. Toutes les lignes tracées sur les deux *fig.* 15 et 16 représentent exactement, dans le rapport de 1 à 3, celles du disque ; en divisant, avec des traits faits à l'aide d'une pointe d'acier, un quart du disque en petits carrés égaux (*fig.* 16), et en ayant sur du papier le dessin d'un disque semblable, on réussit avec exactitude à rapporter sur celui-ci les points trouvés sur le disque métallique.

Voici les conséquences principales de nos expériences, qu'on peut vérifier très-aisément en opérant avec l'appareil que j'ai décrit :

1°. En tenant une extrémité du galvanomètre fixe sur le centre *p* (*fig.* 15 et 16) du disque, et en parcourant avec l'autre les différents points du rayon polaire *pi*, les courants obtenus ont tous la même direction, depuis les points les plus rapprochés du centre jusqu'à S qui, dans ce cas, correspond à la projection du centre du pôle : entre *p* et S le courant est nul, quels que soient la force de l'aimant, la nature et le diamètre du disque ; de S jusqu'en *i* ou au bord du disque, une extrémité du galvanomètre étant toujours fixe au centre, les courants reparaissent, mais en sens contraire à ceux de la partie du disque qui est placée entre S et le centre.

2°. Une fois trouvé le point S, que j'appellerai *neutre*, en continuant à tenir fixe une extrémité du galvanomètre au centre, et en parcourant avec l'autre les points de la li-

gne à peu près circulaire SENO, on n'a jamais de courant, et l'on parvient ainsi à tracer une ligne que j'appellerai *neutre* et *d'inversion*, pour exprimer simplement les effets observés avec le galvanomètre. Entre les différents points de cette ligne, comme entre le centre du disque et les points de la ligne neutre, les courants sont nuls.

3°. Entre le centre et tous les points du diamètre vertical *lpm* qui est normal à la ligne polaire *hpi*, les courants sont aussi nuls : il faut remarquer que lorsque l'induction a lieu en tenant le disque fixe et en fermant ou en ouvrant le circuit, les courants sont le plus forts possible sur le diamètre vertical, tandis que sur la ligne polaire l'induction est nulle.

4°. La ligne que j'ai appelée *neutre* partage le disque tournant en un nombre de régions égales et symétriques ; quels que soient les points de deux régions voisines sur lesquels les extrémités du galvanomètre sont appliquées, les courants obtenus ont tous les mêmes directions et ne diffèrent que par l'intensité.

5°. La forme et la position de la ligne neutre SENO éprouvent de petites variations suivant la distance des pôles du disque et la forme de l'aimant. Ainsi, avec un aimant cylindrique dont l'axe est parallèle au disque, la ligne neutre se rapproche du centre, et devient une ellipse dont l'axe le plus long est sur la ligne polaire. Avec un seul aimant normal au disque, cette ligne se replie pour traverser le centre. En allant avec l'aimant vers le bord du disque, la ligne neutre, toujours déterminée en tenant une des extrémités du galvanomètre fixe au centre, cesse d'être une courbe fermée, et, au contraire, elle se replie vers le bord du disque qu'elle coupe normalement. Lorsque l'axe magnétique est tangent au bord du disque, la

ligne neutre coupe le rayon polaire à une très-petite distance du bord auquel elle s'approche, d'autant plus que le pôle est plus près du disque.

Si l'on fait tourner un tube cylindrique (*fig.* 9) de métal autour de son axe et en présence d'un aimant dont l'axe est normal à celui du cylindre et le coupe à moitié, la ligne neutre est encore circulaire et coupe le cylindre en deux moitiés. Le même résultat a lieu dans un cylindre plein; la surface circulaire neutre qu'on aurait alors, représente le cas d'un disque dont le plan coïncide avec celui de l'axe de l'aimant inducteur et dans lequel il n'y a pas induction sur le disque.

6°. Ayant une extrémité du galvanomètre fixe sur le centre du disque et en s'éloignant avec l'autre successivement d'une distance égale, le courant trouvé sur le rayon polaire *pi*, dont la direction est la même de *p* en S, augmente d'intensité jusqu'à un certain point *a*, qui est dans notre cas éloigné de 12 millimètres de la projection du centre du pôle et diminue ensuite jusqu'au point S de la ligne neutre. Au delà de cette ligne, les courants de direction contraire augmentent d'intensité jusqu'au point *b*, qui est à peu près à 20 millimètres de la projection du pôle, et diminuent ensuite jusqu'au bord du disque. Si l'on tient une extrémité du galvanomètre fixe sur un de ces points *a* ou *b*, que j'appellerai *maxima*, les courants ont la même direction quand on touche avec l'autre extrémité un point quelconque de la région à laquelle le premier point appartient. La position des points *maxima* et la distance qui les sépare en deux régions voisines, dépendent principalement de l'épaisseur de l'aimant et de la grandeur du disque. Ainsi, avec un électro-aimant formé d'un cylindre de fer très-mince, les deux *maxima* sont très-rapprochés de la

ligne neutre, de sorte qu'un très-petit déplacement d'une des extrémités du galvanomètre, à droite ou à gauche de la ligne neutre, donne des courants contraires et les plus forts possible. Sur le grand disque et avec les deux pôles de l'électro-aimant en face du milieu des rayons, les *maxima* de la région externe se rapprochent des bords.

7°. Avec une extrémité du galvanomètre appliquée sur un point quelconque d'une région, on trouve, en variant la position de l'autre extrémité presque au hasard, des points qui ne donnent pas de courant, et qui, réunis, forment des lignes que j'appellerai de *nul courant;* on reconnaît l'existence d'une de ces lignes, comme on a fait pour la ligne neutre, par les courants contraires obtenus en allant avec une extrémité du galvanomètre à droite et à gauche de ces points. Ces lignes, à une certaine distance des bords du disque, sont fermées et presque circulaires, et il y en a qui se dirigent vers ces bords, qu'elles coupent à angle droit. J'ai marqué sur la *fig.* 16 avec les nombres 1, 2, 3, 4, etc., les lignes de nul courant de deux régions voisines. Les distances qui séparent les différents points d'une ligne de nul courant et ceux qui, placés à droite ou à gauche de cette ligne, donnent des courants opposés d'une certaine intensité, sont d'autant plus grandes, qu'on agit sur les parties du disque les plus éloignées des pôles.

8°. En donnant au disque une grande vitesse de rotation, on trouve que le diamètre neutre vertical *im* (*fig.* 15) se déplace dans le sens du mouvement d'une quantité qui augmente avec cette vitesse; de même la ligne neutre circulaire ESON se resserre à mesure que la rotation devient plus rapide. On réussit à rendre ces déplacements très-sensibles en employant le grand disque avec une vitesse

de cinq, six à dix tours par seconde, ou un petit disque auquel on communique une vitesse de vingt-cinq à trente tours par seconde.

9°. La position des lignes de nul courant n'est pas sensiblement altérée par la nature ou l'épaisseur du disque.

Pour peu qu'on ait suivi attentivement la description des résultats précédents qui reposent sur des expériences incontestables, on aura dû se convaincre qu'on était bien loin de la vérité, en admettant, comme on l'avait fait jusqu'ici, que l'état électrique du disque tournant consistait en un faisceau de courants qui traversent le disque en suivant la ligne polaire et qui se déchargeaient de deux côtés.

Voyons maintenant comment il faut interpréter les résultats que je vous ai décrits, et, pour nous rendre cette tâche plus facile, je commencerai par rappeler un autre cas d'équilibre dynamique de l'électricité, qui est celui de la propagation d'un courant électrique dans une plaque conductrice très-mince.

Voici (*fig.* 17) une feuille carrée ou circulaire d'étain, que je choisis aussi mince et aussi étendue que possible et qui est collée sur une planche. J'applique solidement sur un diamètre de cette lame les extrémités + et − des deux conducteurs égaux, réunies aux deux pôles d'un seul élément de Daniell ; ces extrémités sont à $0^m,50$ entre elles et à la même distance des bords. J'ai un galvanomètre dans le circuit voltaïque pour m'assurer que la force du courant ne change pas sensiblement lorsque je touche avec les extrémités d'un bon galvanomètre à fil court deux points quelconques de la lame.

Je porte les deux extrémités du fil galvanométrique, l'une à droite et l'autre à gauche d'un des pôles de la pile, à la distance de quelques centimètres entre elles, sur une

ligne qui est à peu près normale à la droite qui joint les deux pôles. Supposons le cas le plus probable, c'est-à-dire celui où l'on a une certaine déviation dans le galvanomètre; alors je tiens fixe une des extrémités et je change la position de l'autre en la portant vers la droite ou vers la gauche. Je trouve bientôt la direction dans laquelle je dois continuer ce déplacement pour obtenir une déviation qui descende jusqu'à zéro et qui apparaisse ensuite dans le sens contraire. La réunion des points entre lesquels le courant dérivé est nul, trace une ligne d'*égale tension* ou de *niveau*, dans laquelle, suivant la théorie de M. Ohm, il ne peut y avoir aucun mouvement d'électricité : en renouvelant cette recherche sur d'autres points de la lame, on parvient à décrire un certain nombre de ces lignes et à déterminer ainsi ce qu'on peut appeler l'*état électrique* de la lame.

Disons un mot sur les propriétés de ces lignes.

Autour des pôles de la pile, et en se tenant à une grande distance des bords de la lame, les lignes de niveau sont à peu près des cercles à centres variables, placés sur la droite qui joint les pôles. En passant successivement avec les deux extrémités du galvanomètre sur les différents points qui appartiennent à deux de ces lignes, les courants qu'on obtient ont partout une intensité constante, quelle que soit la force de la pile. Les lignes de nul courant se replient toujours à proximité des bords de la lame, de manière à les couper normalement. La ligne *ab* qui coupe à moitié la droite joignant les pôles, est non-seulement une ligne de nul courant, mais aussi *une ligne neutre et d'inversion ;* une extrémité du galvanomètre étant appliquée sur un point quelconque de cette ligne, on a des courants opposés en portant l'autre en contact des deux régions séparées par cette ligne. En ajoutant à l'un des côtés de la

feuille d'étain et vers un des points + ou —, sur lesquels sont fixés les pôles de la pile, une lame métallique qui peut avoir plusieurs mètres de longueur, la ligne d'inversion se déplace et prend la forme d'une ligne à peu près circulaire qui renferme ce point.

La forme des lignes de nul courant sur la lame est indépendante de la force de la pile.

Tels sont les résultats des expériences faites pour déterminer l'état électrique d'une lame métallique, dont deux points sont en contact des pôles d'une pile. Ce n'est pas dans ce cours que je dois m'arrêter pour vous montrer comment l'heureuse application faite par M. Ohm de l'équation fondamentale de la propagation de la chaleur donnée par Fourier à la théorie du circuit voltaïque, a pu conduire M. Kirchoff, avant le secours de l'expérience, à déterminer les propriétés et la forme des lignes d'égale tension de la lame métallique. Personne n'ignore tous les services que cette application a rendus à la physique, et la démonstration rigoureuse que M. Pouillet en a donnée avec la découverte des lois générales des courants électriques.

Pour nous faire une idée de l'équilibre mobile de l'électricité sur la lame, nous imaginerons que sur tous ses points persiste un *état électrique* ou une espèce de tension de signe contraire de deux côtés de la ligne neutre, dont la grandeur peut être représentée par une ordonnée, qui augmente de deux côtés en allant vers les pôles. Il est naturel d'admettre que, tout étant symétrique autour des points touchés par les pôles de la pile, les fluides électriques se neutralisent entièrement sur la ligne neutre, et qu'il n'y ait pas d'état électrique libre sur les points de cette ligne. Le fil du galvanomètre, qui ne modifie pas la

conductibilité de la lame, est parcouru par un courant indiquant la différence des états électriques ou des ordonnées qui correspondent aux deux points de la lame touchés par les extrémités de ce fil, et ressemble à un thermomètre différentiel dont les deux boules sont en contact d'un barreau métallique ayant ses extrémités maintenues à une différence constante de température.

Passons au disque d'Arago, et voyons comment les résultats de nos expériences nous conduisent à comprendre l'état électrique de ce disque.

Nous avons dit qu'on ne trouve pas de courants en tenant une extrémité du galvanomètre en contact du centre du disque, et l'autre extrémité sur un point du rayon polaire, qui correspondait dans les conditions de notre expérience à la projection de l'axe de l'aimant inducteur, et qu'on a des courants très-forts et de sens contraire, pour peu qu'on déplace cette seconde extrémité en allant vers le centre ou vers le bord du disque. Nous avons aussi reconnu que cette même propriété appartenait à une série de points distribués sur une ligne à peu près circulaire, qui passerait par la projection de l'autre pôle ou par le centre du disque dans le cas d'un seul aimant inducteur. Quoique les propriétés trouvées dans cette ligne ne paraissent pas différer de celles d'une autre ligne quelconque de nul courant, nous réussirons facilement à prouver que l'état électrique des points de cette ligne est nul, et qu'elle représente, par conséquent, la ligne neutre trouvée sur la lame d'étain. Puisqu'on ne trouve pas de courant entre la ligne neutre et le centre du disque, nous n'avons qu'à prouver que l'état électrique du centre est nul, pour qu'on soit forcé d'admettre qu'il en est de même des états électriques des points de la ligne neutre. Sans nous arrêter à

la considération de l'immobilité du centre du disque, qui ne pourrait s'appliquer absolument qu'à un point géométrique, ni à celle de l'action qu'on aurait pu supposer nulle de deux pôles contraires sur la partie centrale du disque, car nous savons qu'on trouve des courants, quoique très-faibles, sur un très-petit disque tournant entre ces pôles, je préfère vous prouver par l'expérience que l'état électrique du centre du disque tournant est nul. Je remplace ce disque par un autre d'un diamètre et d'une épaisseur double, et j'emploie un seul électro-aimant inducteur. Après avoir déterminé la ligne neutre, en tenant, comme nous l'avons dit, une extrémité du galvanomètre fixe sur le centre, je répète l'expérience en tenant cette extrémité fixe ou sur le centre ou sur un autre point quelconque de la ligne neutre, et en portant l'autre extrémité en contact du bord du disque dans les points les plus éloignés du pôle ; dans tous les cas, le courant est nul, comme il serait nul si je touchais dans le même temps deux points placés à une grande distance de l'électro-aimant. Ce résultat, que j'ai aussi vérifié sur le grand disque, met hors de doute que la ligne SENO, déterminée en tenant une extrémité du galvanomètre au centre, doit être considérée comme neutre. Cette ligne partage chaque moitié du disque en deux régions qui ont des états électriques contraires ; le signe de ces états est marqué par la direction du courant correspondant, en prenant pour positif l'état du point du disque d'où le courant sort pour entrer dans le fil du galvanomètre, et pour négatif l'autre qui reçoit le courant de ce fil. Sur le disque comme sur la lame, la distribution des états électriques est indiquée par les lignes de nul courant ou *courbes d'égale tension*, qui représentent des séries de points, ou des bandes sur lesquelles la grandeur de ces

états est la même. La surface de notre disque (*fig.* 15 et 16) est divisée par le diamètre *lpm* en deux demi-cercles, séparés chacun en deux régions d'état électrique contraire par la ligne neutre ESON; dans chacune de ces régions, les lignes de nul courant 1, 2, 3, 4, 5, etc., représentent la distribution des états électriques, et les *maxima* de ces états, qui correspondent aux points de la lame d'étain touchés par les pôles de la pile, résident évidemment aux centres *a* et *b* des petits espaces renfermés par des lignes de nul courant de forme à peu près circulaire.

Le zinc qui s'oxyde dans la pile, fournit continuellement à tous les points de la lame d'étain que nous avons étudié une nouvelle électricité qui remplace celle qui est incessamment neutralisée par celle de nom contraire; dans le disque, le mouvement renouvelle toujours les points sur lesquels l'induction se développe et dure pendant un temps très-petit en comparaison de celui de la rotation; de cette manière, les mêmes états électriques persistent fixes dans l'espace, bien que les points matériels où ils résident changent continuellement.

Quelle que soit, en définitive, la *signification physique* des états électriques que nous avons supposée exister dans les différents points de la lame traversée par un courant, néanmoins l'existence et les propriétés des lignes neutres et des lignes de nul courant sur la lame, comme sur le disque tournant en présence de l'aimant, restent démontrées par des expériences rigoureuses : il s'ensuit donc que, sur la lame comme sur le disque, les flux *maxima* qui représentent les filets ou les courants électriques vont d'un pôle à l'autre, traversant normalement les lignes de nul courant.

Je ne puis vous laisser ignorer que cette manière de

considérer l'état électrique du disque tournant s'applique aussi au disque induit lorsqu'il est fixe. Nous avons déjà vu que des mouvements d'attraction ou de répulsion ont lieu dans un disque de cuivre suspendu à l'extrémité d'un levier mobile en face du pôle d'un électro-aimant : en fermant le circuit, le disque est repoussé, et en le laissant revenir à sa place, si l'on ouvre le circuit, le disque est attiré vers le pôle. Nous avons admis que des courants induits, parallèles à ceux de l'électro-aimant, se développent dans le disque, et nous avons vérifié cette supposition en coupant le disque le long d'un de ses rayons et en appliquant les deux extrémités du galvanomètre aux bords de l'entaille. En admettant dans le disque continu dont le centre est dans l'axe de l'aimant des courants induits circulaires, il en résulterait que les lignes de nul courant seraient représentées par les rayons du disque. Ainsi donc la différence dans les états électriques des points du disque touchés par les extrémités du galvanomètre au moment de l'induction, n'existerait pas dans le cas que nous considérons maintenant, ou, si elle existait, elle serait renfermée dans chaque molécule séparée en deux moitiés par une ligne neutre. Effectivement, l'expérience nous montre que, quand on applique les extrémités du galvanomètre sur différents points d'un disque métallique au moment où l'action magnétique commence ou cesse, on n'obtient jamais des signes de courants, si l'on a soin d'éviter l'action inductrice sur les fils du galvanomètre.

Est-il prouvé que des courants existent dans le disque tournant, indépendamment de l'arc métallique qu'on forme en le touchant avec les extrémités du galvanomètre; et si ces courants existent, quelle est leur direction dans la ligne polaire; comment se distribuent ces courants dans

les parties du disque sur lesquelles l'action inductrice de l'aimant est nulle ou très-faible?

L'existence de courants dans le disque tournant nous est prouvée par les forces qui se développent entre lui et l'aimant inducteur, et par l'analogie entre l'état électrique découvert dans ce disque et celui d'une lame métallique qui est traversée par un courant.

Nous avons trouvé, en considérant comme nul l'état électrique du centre du disque, que tous les points de la région intérieure (*fig.* 15 et 16) entre le centre et la ligne neutre, sont positifs, et que tous les points de la région extérieure entre cette ligne et le bord du disque (1) sont négatifs, lorsqu'on a un pôle sud, ou qui se tourne vers le nord, au-dessous du disque, et que celui-ci tourne comme l'index d'une montre. Nous savons aussi qu'il y a dans ces deux régions des points *a* et *b* qui possèdent le *maxima* des états électriques de ces régions. Il faut donc nous représenter ces points *a* et *b* par les deux élements d'un couple voltaïque compris entre eux et dont les courants vont de *b* vers *a* au-dessus du pôle sud, comme s'il y avait en *b* la lame de zinc et en *a* celle de platine. Des deux extrémités de cette pile, les fluides électriques se déchargent à droite et à gauche du pôle inducteur, et il se forme ainsi deux systèmes de courants que l'induction renouvelle constamment dans les mêmes points de l'espace : dans l'intérieur du couple ainsi supposé, comme à l'extérieur, la ligne neutre résulte, de même que sur la lame d'étain traversée

(1) Dans le dessin qui a paru avec l'extrait de mon Mémoire, publié dans le cahier des *Annales de Physique et de Chimie* (octobre 1853), les courants et les états électriques sont indiqués par des signes contraires à ceux des *fig.* 15 et 16, parce que les pôles étaient placés au devant du disque au lieu de l'être au-dessous.

par le courant, d'une série de points sur lesquels les deux fluides se neutralisent entièrement.

Rappelons ici l'expérience du fil métallique réuni aux extrémités du galvanomètre qu'on transporte rapidement d'un côté à l'autre du pôle d'un électro-aimant (*fig.* 8); le courant développé dans ce fil a la même direction que celui qui se forme dans la partie radiale du disque qui passe sur le pôle et se décharge également dans les parties du circuit qui n'éprouvent pas l'action inductrice.

Pour déterminer rigoureusement la direction des courants induits par le pôle sud de l'électro-aimant dans l'expérience que nous avons examinée (*fig.* 16), il faut tracer sur le disque des lignes qui coupent normalement les lignes de nul courant. Les lignes ponctuées de notre dessin (*fig.* 16) représentent les courants du disque, et l'on voit en effet ces lignes se réunir dans les petits espaces renfermés par les lignes circulaires de nul courant les plus resserrées, qui indiquent le siége des pôles *a* et *b* de la pile ou des piles induites dans le disque. Ces lignes ponctuées représentent ainsi deux systèmes de courants dont le faisceau principal suit la ligne polaire pour se répandre et rayonner ensuite latéralement.

Il n'y a qu'à se rappeler quelles sont les directions des courants dans un solénoïde et les noms des pôles magnétiques représentés par ses extrémités, pour comprendre immédiatement que le système de courants développé par induction dans la partie de notre disque qui s'éloigne du pôle, exerce sur celui-ci une action attractive comme le ferait un pôle de nom contraire, et que le système de courants formé dans la partie qui s'approche du pôle représente une action répulsive semblable à celle d'un pôle du même nom.

J'ai construit avec un fil de cuivre enveloppé de soie et fixé sur une table de bois couverte d'une couche de cire (*fig.* 18) un système électrodynamique imitant celui que nous avons vu se développer par induction dans un disque métallique (*fig.* 16); un barreau aimanté est suspendu horizontalement sur cette table, ayant chacun de ses pôles placés entre les deux extrémités du système électrodynamique qui représentent deux pôles de nom contraire. En faisant passer un courant dans ce système, l'aiguille se tourne immédiatement pour obéir aux attractions et répulsions qui se produisent entre ces pôles et les circuits électrodynamiques; si l'on donne à la table un mouvement de rotation autour du centre de l'aiguille dans le sens où a eu lieu le premier mouvement de l'aiguille, celle-ci sera entraînée et suivra la table dans son mouvement. La force tangentielle du disque d'Arago se trouve donc naturellement expliquée.

Quant à la force répulsive que le disque tournant exerce sur le pôle d'une aiguille placée verticalement, nous devons rappeler ici une des conséquences tirées de nos expériences, et qui est venue confirmer l'hypothèse avancée par Faraday, pour expliquer cette force. L'expérience nous a prouvé qu'en donnant au disque une grande vitesse de rotation, les lignes neutres et d'inversion sont déplacées dans le sens du mouvement proportionnellement à cette vitesse; ce qui nous a démontré qu'un temps, quoique très-court, mais fini et comparable à celui de la rotation du disque, est nécessaire au développement de l'induction. La conséquence de cette influence du temps est que les espaces occupés par des états électriques d'une certaine grandeur et traversés par les courants correspondants, tendent toujours à se dilater dans le sens de la ro-

tation. Du moment que l'axe du faisceau électrodynamique qui agit sur le pôle de l'aimant vertical ne tombe plus sur le centre de celui-ci, il doit se produire entre les courants et l'aimant suspendu verticalement une action qui sera répulsive si la partie postérieure du faisceau empiète sur le pôle. Rien n'est plus facile que d'imiter cette répulsion avec un circuit voltaïque.

Avec ces mêmes principes on se rend également raison de la répulsion qu'éprouve en dehors du disque ou vers son centre une aiguille d'inclinaison qu'on promène le long d'un rayon de ce disque. La force qui émane du disque sur le pôle de l'aimant vertical est toujours répulsive à cause du déplacement des courants; mais suivant que l'induction s'exerce sur les parties périphériques ou vers le centre du disque, les courants développés dans ces deux positions (1) repoussent l'aiguille vers les points où leurs actions sont le plus faibles, comme il résulte des expériences d'Arago.

On conçoit aussi comment un disque de cuivre sur lequel oscille une aiguille magnétique doit faire vite diminuer l'amplitude des oscillations sans en changer sensiblement la durée. Le mouvement de l'aiguille développe successivement, dans les différents points du disque sur lesquels il oscille, deux systèmes de courants dont l'antérieur agit par répulsion sur l'aiguille, et le postérieur par attraction.

Tout s'accorde donc pour arrêter promptement le mouvement de l'aiguille, d'autant plus que les courants in-

(1) Dans mon Mémoire sur l'*État électrique d'un disque tournant en présence d'un aimant*, qui paraîtra bientôt, publié dans les *Annali dell' Università Toscana*, j'ai décrit les expériences faites en tenant un seul pôle ou près du bord ou près du centre du disque.

duits les plus forts correspondent aux points où la vitesse de ce mouvement dans chaque oscillation est la plus grande, c'est-à-dire autour de la ligne d'équilibre de l'aiguille.

Pour concevoir comment la durée de l'oscillation n'est pas sensiblement altérée par la présence du disque, on peut comparer le mouvement de l'aiguille à celui d'un pendule qui oscille dans un milieu plus dense et plus résistant; la durée de l'oscillation n'est pas sensiblement altérée à cause de la diminution correspondante qui a lieu dans son amplitude.

Après avoir montré, avec une exactitude à laquelle on n'était pas encore arrivé, quelle est la distribution des états électriques développés par induction dans le disque tournant, et comment de cette distribution on déduit la direction des courants et les forces qui se manifestent entre l'aimant et le disque, il nous reste à parler de l'influence exercée sur les phénomènes du *magnétisme par mouvement* par les différentes causes qui modifient l'induction.

Le développement sans cesse renouvelé d'une force électromotrice dans les différents points d'une masse métallique et la neutralisation de cette force dans toutes les directions, forment nécessairement un problème compliqué de physique mathématique, et c'est à la physique expérimentale à fournir les données nécessaires pour la solution.

Examinons d'abord l'influence de la vitesse. Dès les premières expériences sur le disque tournant, on s'est aperçu que son action sur l'aiguille aimantée et la force des courants obtenus en appliquant sur lui les extrémités du galvanomètre, augmentaient avec la vitesse de rotation. Dans nos recherches sur l'état électrique du disque,

dont je vous ai rapporté les conséquences principales, on a trouvé constamment des courants plus forts en tenant une des extrémités du galvanomètre fixe sur la ligne neutre qui passe par la projection de l'axe magnétique, et l'autre à une distance donnée dans la région extérieure, que lorsque cette seconde extrémité touche un point de la région intérieure placé à la même distance de la ligne neutre : cette différence, qui augmente avec la vitesse de rotation, prouve aussi que la force des courants des différents points du disque varie avec la vitesse de ces points.

Il est en effet de l'essence du phénomène de l'induction et par conséquent du magnétisme par rotation en tant qu'il dépend de ce phénomène, que la force électromotrice et l'intensité des courants induits soient proportionnelles à la différence de la vitesse relative de l'aimant inducteur et des points induits du disque : la force tangentielle développée dans un disque métallique par la rotation de l'électro-aimant devrait donc augmenter avec la vitesse de cette rotation, du moins jusqu'à ce qu'elle parvienne à être dans un rapport comparable avec le temps nécessaire au développement de l'induction. M. Harris a trouvé, en faisant tourner le disque avec des vitesses de cent soixante dix-huit, trois cent cinquante-sept et sept cent quatorze tours par minute, que les sinus des angles de déviation du barreau aimanté sont proportionnels à ces vitesses.

J'ai mesuré dans une expérience faite avec le fil de torsion les forces développées dans un disque de cuivre de 60 millimètres de diamètre et de 2 $\frac{1}{2}$ millimètres d'épaisseur : les vitesses de rotation de l'électro-aimant (*fig.* 12) étant de cinquante-deux et de cent trente-trois tours par minute, les forces correspondantes étaient 26 et 61,

c'est-à-dire qu'elles ont augmenté dans une proportion un peu moins grande que celle des vitesses.

M. Christie d'abord, MM. Prévost et Colladon ensuite, et enfin M. Harris se sont occupés à déterminer l'influence de la distance sur la force développée dans un disque par la rotation de l'aimant. Les deux physiciens génevois ont trouvé que cette force croît en raison inverse de la puissance $2\frac{1}{5}$ de la distance; selon M. Harris, la variation aurait lieu en raison inverse du carré.

En réfléchissant sur les conditions de ces expériences, dans lesquelles l'effet qu'on mesure dépend de l'action réciproque entre l'aimant et les courants que l'aimant développe par induction dans toute la masse du disque, et à la distribution des forces magnétiques autour des deux pôles contraires d'un aimant, on conçoit facilement comment cette loi de la distance, déduite expérimentalement, ne peut être déterminée que dans chaque cas particulier, et comment elle doit varier avec l'épaisseur du disque employé. Bornons-nous donc à admettre que la force tangentielle diminue rapidement avec l'accroissement de la distance entre l'aimant et le disque, et que la variation est d'autant plus rapide qu'on opère à des distances plus petites.

MM. Herschel et Babbage, à qui on doit les meilleures expériences faites immédiatement après celles d'Arago, trouvèrent que les corps interposés entre le disque et l'aimant n'exercent aucune influence sur les phénomènes du magnétisme par rotation; il n'y a que le fer doux qui diminue notablement les forces développées par la rotation, et nous avons vu dans les leçons précédentes des effets semblables produits sur l'induction des courants dans les fils métalliques.

Décrivons maintenant les résultats obtenus en étudiant l'influence exercée sur les phénomènes du magnétisme par rotation par la nature des corps soumis à l'aimant. Il serait inutile de vous rapporter ici tous les nombres, très-différents entre eux, auxquels on est parvenu en employant des méthodes différentes et surtout des corps dont les propriétés physiques et la pureté n'étaient pas les mêmes. MM. Herschel et Babbage ont fait tourner des disques de différents métaux sous une aiguille aimantée horizontale; dans d'autres expériences, c'était un aimant dont la force magnétique était certainement très-grande en comparaison de celle de cette aiguille, qui tournait sous les disques du même diamètre, formés de métaux différents. M. Harris a employé dans une recherche semblable la méthode des oscillations d'Arago, en substituant au disque un anneau au milieu duquel l'aiguille oscillait. M. Seebeck, MM. Nobili et Baccelli ont fait aussi des recherches semblables.

Malgré les différences trouvées par ces observateurs dans l'échelle de ces pouvoirs, dont il est facile de se rendre compte, il est certain que ces pouvoirs varient avec la conductibilité des métaux, sans être proportionnels aux nombres relatifs généralement admis pour représenter cette propriété. Voici l'ordre dans lequel on peut disposer les métaux suivant ces pouvoirs : argent, cuivre, zinc, étain, mercure à l'état solide, antimoine, mercure, bismuth. On voit qu'il existe entre ces pouvoirs des différences moins grandes que celles qui passent entre leurs conductibilités. MM. Herschel et Babbage, qui ont réussi à produire un mouvement très-faible de rotation dans le coke (*coal gas*), n'ont obtenu aucun effet en agissant sur le bois, le verre, la résine, l'eau, l'acide sulfurique, etc.

Nous verrons dans la prochaine leçon des effets qui prouvent l'influence de l'aimant tournant sur des masses isolantes et chimiquement pures ; je me borne dans ce moment à vous dire que tout en employant un électro-aimant très-fort, je n'ai pas réussi à produire un mouvement de rotation dans des liquides très-bons conducteurs, tels que les solutions acqueuses d'acide sulfurique et azotique. Il arrive souvent dans ces expériences que le corps soumis à l'aimant tournant prend un petit mouvement de rotation, qui n'arrive jamais à une révolution entière, et qu'en augmentant la vitesse de l'aimant ce mouvement se ralentit, ce qui dénote bien qu'il n'est pas dû à la même cause du magnétisme par rotation des métaux, mais à quelque défaut de symétrie dans l'action des deux pôles et dans la forme du corps. On évite facilement ces illusions en employant un électro-aimant et en fermant le circuit lorsque la rotation de l'électro-aimant est devenue uniforme.

C'est encore à la leçon suivante que nous renvoyons la description des expériences fondamentales d'Arago, et de celles faites après par M. Harris, qui prouvent l'influence de certaines matières isolantes, privées de fer, sur l'amplitude des oscillations de l'aiguille aimantée.

Passons à étudier l'influence de la quantité de matière soumise à l'aimant tournant. Le simple énoncé de cette recherche fait entrevoir qu'elle peut être compliquée par la loi des distances, et en vous rapportant différentes expériences à ce sujet, je ne pourrai vous donner que les résultats obtenus dans des cas particuliers.

Je commence par vous rappeler l'expérience des deux disques de cuivre, au milieu desquels je fais osciller un

barreau aimanté horizontal. Chaque disque de cuivre a 144 millimètres de diamètre et a été coupé sur une lame de $0^{mm},75$ d'épaisseur. Le barreau aimanté est long de 106 millimètres et fait 20 oscillations en soixante-huit secondes. Ce barreau est suspendu à plusieurs fils de cocon, et, au moyen d'un petit trou fait au centre du disque supérieur, il oscille à 7 millimètres de distance avec son axe des surfaces internes des deux disques. Pour descendre de 68 degrés à 42, le barreau fait 6 oscillations, et pour arriver de 68 degrés à 14, il fait 21 oscillations. La même aiguille, à la même distance du disque supérieur, fait 11 et 38 oscillations pour diminuer des arcs indiqués : en présence de l'autre disque ces nombres sont 13 et 41. Ainsi, le nombre des oscillations entre les deux disques, ou lorsque la force retardatrice est double, est approximativement la moitié des nombres d'oscillations qu'elle fait en présence d'un seul disque, pour descendre du même arc.

M. Christie, en mesurant par la torsion les forces développées par l'aimant tournant dans des disques de poids différents, a trouvé que ces forces varient avec le poids des disques lorsque leur distance des pôles est très-petite. Je rapporterai encore le résultat d'une expérience faite avec deux sphères de cuivre qui étaient suspendues au fil d'argent de la balance de torsion (*fig.* 12). Ces deux sphères pesaient $12^{gr},910$ et $22^{gr},050$: le point le plus inférieur de ces sphères étant à la même hauteur des pôles, les forces de torsion trouvées en donnant à l'électro-aimant la même vitesse de rotation, étaient 26 et 45, ou approximativement, dans le même rapport des masses. On conçoit facilement que ce rapport ne pourrait plus se vérifier en comparant des sphères dont les diamètres sont

très-différents ; à mesure que les sphères sont plus grandes et que leurs points s'approchent davantage des pôles, les forces trouvées augmentent rapidement avec leurs diamètres.

Lorsque l'on détermine la force tangentielle développée dans un disque de cuivre coupé dans un certain nombre de secteurs égaux, on arrive à un résultat remarquable et dont nous verrons ensuite les applications.

Je décrirai bientôt les expériences qui prouvent la diminution de cette force, en conséquence des sections faites dans un disque suivant ses rayons. Dans ce moment, je me propose de vous montrer quelle est cette force, suivant le nombre des secteurs qu'on laisse sous l'action de l'aimant. Je suppose avoir un disque de cuivre de 52 millimètres de diamètre, coupé en quatre secteurs égaux, suspendu à un fil de torsion. En faisant tourner l'électro-aimant, la force de torsion qui fait équilibre est de 188 degrés du micromètre. En laissant seulement les deux secteurs opposés, cette force devient 95 degrés, et avec un seul secteur elle est réduite à 48 degrés. Ces nombres s'accordent exactement pour prouver que les forces sont proportionnelles au nombre des secteurs sujets à l'action de l'aimant. J'ai répété cette expérience sur un disque de lame de cuivre beaucoup plus mince que le précédent, en arrivant au même résultat. Dans d'autres expériences, dont nous verrons l'application dans la leçon suivante, j'ai opéré sur des disques de lame de cuivre très-minces, et qui n'avaient que 20 millimètres de diamètre. Ces disques étaient suspendus sur l'électro-aimant tournant (*fig.* 12) à un fil simple de cocon, et les forces étaient mesurées ou avec la formule du mouvement accéléré, ou étaient prises comme réciproquement propor-

tionnelles à la durée des révolutions uniformes. Les résultats, qui ont été les mêmes avec les deux méthodes, ont confirmé ceux obtenus avec la torsion. Ainsi donc, en ayant un disque métallique coupé à moitié, ou en quatre, six ou huit secteurs égaux, la force diminue proportionnellement au nombre des secteurs qu'on laisse en activité, en partant de la force du disque coupé dont ces secteurs font partie.

On peut facilement comprendre les effets obtenus sur des disques ou des sphères métalliques, formés avec des lames ou des couches d'épaisseurs différentes : les forces développées par l'aimant tournant ne sont plus proportionnelles aux masses métalliques, et les disques ou les sphères plus minces prennent le dessus. Ainsi la force tangentielle, pour un disque de cuivre qui pèse $10^{gr},340$, est de 380 degrés de torsion, et pour un disque du même diamètre placé avec sa surface inférieure à la même distance des pôles et qui ne pèse que $0^{gr},310$, la force est de 16 degrés. J'ai comparé avec la même méthode deux sphères de cuivre du même diamètre, dont l'une pesait 59 grammes, et l'autre, formée d'une couche très-mince, pesait seulement $10^{gr},850$: les forces de torsion étaient dans le rapport de 1 : 0,71. Évidemment les couches internes et plus éloignées des pôles magnétiques éprouvent des actions plus faibles. Dans les conditions où l'influence de la distance variable des couches est moins grande, comme on l'obtient en faisant osciller une aiguille aimantée horizontale au milieu d'un anneau de cuivre, composé de plusieurs anneaux concentriques très-minces, formés de la même lame, l'influence de chacun de ces anneaux sur l'amplitude de l'oscillation est à peu près la même, comme l'avait trouvé aussi M. Harris, soit que l'an-

neau agisse isolément des autres, soit qu'il fasse partie de l'anneau composé.

Il était important d'étudier l'effet de la conductibilité et de la masse du disque, soumis à l'aimant tournant, sur les courants obtenus, en appliquant sur ce disque les extrémités du galvanomètre. Nous savons que ces courants sont proportionnels aux états électriques des points du disque touchés par ces extrémités, et que les forces électromotrices développées sur les pôles se déchargent dans le disque suivant les lois générales de la propagation des courants. La quantité d'électricité qui se neutralise par le circuit du galvanomètre, n'est ainsi qu'une portion très-petite de celle qui se décharge dans le disque. Il en résulte, comme l'expérience le prouve, que les courants obtenus sur un disque plus ou moins épais, ou plus ou moins conducteur, placé dans les mêmes conditions relativement à l'aimant tournant, seront peu différents entre eux. Pour rendre ces différences sensibles, il faut comparer des disques d'épaisseurs très-différentes. Un disque de cuivre de 28 millimètres d'épaisseur a donné un courant de 28 degrés dans les mêmes circonstances où un disque de 1 millimètre produisait un courant de 36 degrés; en plaçant le disque plus mince à la même distance des pôles que la couche inférieure du disque épais, on trouve un résultat contraire, c'est-à-dire un courant plus faible sur le disque qui n'a que 1 millimètre d'épaisseur. Les couches inférieures du disque épais, qui, dans le premier cas, servent à décharger les courants développés dans les couches les plus rapprochées de l'aimant, augmentent, dans le second cas, la portion des courants qui entrent dans le galvanomètre.

Je crois qu'il n'est pas sans intérêt de vous montrer les effets différents que l'aimant tournant développe dans une

masse métallique dont la conductibilité n'est pas la même dans toutes les directions, relativement aux lignes de force magnétique. J'ai formé cette masse avec des lames de cuivre tellement minces, qu'on peut considérer comme presque nul le développement des courants induits dans le sens de leur épaisseur. Les lames du cube ainsi formé (*fig.* 13), qui a 10 à 15 millimètres de côté, ont été oxydées légèrement à leurs surfaces, en les chauffant à la flamme d'une lampe à alcool, et ensuite réunies par une couche de vernis de gomme laque. Je suspends ce cube à un fil de cocon à la hauteur de 20 millimètres des pôles de l'électro-aimant (*fig.* 12), de manière que ce fil tombe juste sur le milieu de la ligne polaire. En donnant à l'électro-aimant une certaine rotation, je vois le cube tourner très-rapidement s'il est suspendu avec ses lames verticales (*fig.* 13 *a*), tandis qu'il reste immobile, ou fait seulement quelques révolutions si ces lames sont horizontales (*fig.* 13 *b*). Un cube formé avec des morceaux de la même longueur de fil de cuivre donne lieu au même résultat.

Il suffit de changer la position du cube, relativement aux pôles, pour obtenir des effets contraires. Pour cela, je fixe aux extrémités d'une tige très-mince de bois deux cubes semblables au précédent, et je suspends la tige (*fig.* 26) avec un fil de cocon, de manière que les centres des cubes tombent sur les centres des pôles à la hauteur de 15 à 20 millimètres. En faisant tourner l'électro-aimant, la rotation communiquée à la tige sera très-rapide si les lames des cubes sont horizontales, tandis qu'elle serait nulle ou très-lente si ces lames sont verticales.

Pour comprendre ces phénomènes, il n'y a qu'à se rappeler que les courants induits tendent toujours à se développer dans un plan normal à la résultante des forces

magnétiques des deux pôles. Si l'on jette les yeux sur un dessin qui représente les lignes magnétiques de notre électro-aimant, et qu'on obtient en répandant de la limaille fine de fer sur du papier tenu en contact des pôles, on concevra facilement les effets montrés par les cubes formés de lames de cuivre. Entre les pôles, les lignes magnétiques se replient et deviennent presque horizontales, tandis qu'elles s'élèvent presque verticalement sur les pôles ; il faut donc, dans la première position, que les courants induits soient les plus forts si les lames sont verticales, et que le contraire arrive en portant les cubes dans la seconde position.

J'ai particulièrement insisté sur les phénomènes du magnétisme par rotation, obtenus dans une masse métallique dont la conductibilité n'est pas la même dans les deux sens, afin d'être aidé par l'analogie à comprendre les phénomènes importants présentés par le bismuth cristallisé.

J'ai taillé sur une grande masse de bismuth bien cristallisé des cubes, dont deux faces opposées étaient naturelles ou parallèles au clivage principal. J'ai taillé d'autres cubes aussi égaux que possible aux précédents sur un cylindre de bismuth qui avait été fondu dans un tube de verre et refroidi brusquement pour rendre la cristallisation confuse et irrégulière le plus possible. Ces cubes étaient rendus égaux à l'aide d'un comparateur qui découvrait fort aisément $\frac{1}{20}$ de millimètre. J'ai mesuré la force développée dans ces différents cubes suspendus à un fil de cocon à la même hauteur sur les pôles de l'électro-aimant tournant, et j'ai reconnu, dans les cubes de bismuth cristallisé, des effets plus grands lorsque les clivages sont verticaux et perpendiculaires au plan des courants de l'électro-aimant

que quand ces clivages sont suspendus horizontalement. En comparant les forces développées dans les cubes de bismuth cristallisé à celles des cubes formés de bismuth amorphe, j'ai trouvé constamment celles-ci plus grandes que les premières ; la différence la plus grande a été trouvée entre le cube de bismuth amorphe et le cube qui était suspendu avec les clivages horizontaux.

Pour bien réussir dans ces expériences, il faut être sûr que la cristallisation soit la même dans toute l'épaisseur du cube, ce qui arrive difficilement si on le prend de dimensions trop grandes ; je n'ai réussi à obtenir des cubes dont les clivages fussent parallèles dans toute la masse en allant au delà de 10 à 12 millimètres de côté. Nous verrons, dans la dernière leçon de ce cours, un procédé très-propre à indiquer les cubes de bismuth dont les clivages sont bien parallèles aux deux faces opposées, et qui sont les plus propres à ces expériences : ce procédé consiste à suspendre ces cubes entre les pôles d'un électro-aimant avec les clivages verticaux, et à choisir ceux qui se dirigent dans la ligne polaire avec l'axe cristallographique et qui font l'oscillation la plus courte.

On pouvait s'attendre à obtenir plus grandes ces différences, dans les effets produits par l'aimant tournant sur le bismuth cristallisé, en employant des lames carrées au lieu de cubes. C'est, en effet, ce que j'ai trouvé sur trois lames égales qui avaient 4 millimètres d'épaisseur et 7 millimètres de largeur ; une de ces lames (A) était de bismuth amorphe, la seconde (B) avait été taillée avec les clivages parallèles à la face carrée, et la troisième (C) avec ses clivages parallèles à la face rectangulaire. Les trois lames ont été successivement suspendues sur les pôles de l'électro-aimant tournant avec la face carrée ho-

rizontale. La surface inférieure des lames a été constamment à la hauteur de 19 millimètres des surfaces polaires, et j'ai interpolé l'ordre des lames expérimentées pour être indépendant de la variation qu'aurait pu éprouver le courant de l'électro-aimant. J'observais les mouvements des lames avec la lunette du cathétomètre, et je mesurais le temps de leurs révolutions. Voici les nombres trouvés : la lame A a fait huit révolutions en trente-six secondes et un quart, la lame C en trente-six secondes et demie, et la lame B en quarante-trois secondes et demie. J'ai répété ces expériences en suspendant les lames à la même hauteur avec la face carrée verticale. Le temps de huit révolutions a été plus court pour les trois lames, comme il devait être par la distribution différente de la masse autour de l'axe de rotation; mais l'influence de la cristallisation a été aussi évidente que dans les premières expériences, car la lame A a été la plus active, et celle qui a tourné le plus lentement a été cette fois la lame C.

Il est très-probable que des différences de conductibilité électrique existent dans le bismuth cristallisé, suivant le sens de la propagation du courant, relativement au clivage; il se présente à l'esprit des manières différentes par lesquelles on pourra s'assurer expérimentalement de ces différences.

Il me reste à vous décrire l'effet produit dans un disque métallique soumis à l'aimant tournant par les solutions de continuité. C'est encore à Arago qu'on doit la première expérience qui prouve la grande diminution de la force développée dans un disque par l'aimant tournant, lorsqu'on a pratiqué dans ce disque un certain nombre de sections diamétrales. MM. Babbage et Herschel ajoutèrent une autre expérience importante, expliquée ensuite

par la découverte de l'induction, en faisant voir qu'en remplissant avec de l'étain ou avec du bismuth les parties du disque qui avaient été coupées, la force reprenait presque sa valeur primitive.

Je commencerai par vous faire remarquer l'effet différent des sections d'un disque, suivant le sens dans lequel elles sont faites : pour concevoir ces différences, nous n'aurons qu'à nous rappeler la distribution des courants trouvés dans le disque continu. Si l'on soumet à l'expérience deux disques de cuivre dont l'un a un certain nombre de sections diamétrales et l'autre des sections circulaires et concentriques, on trouve que le premier reste beaucoup plus actif que le second. J'ajouterai encore l'expérience d'un disque de cuivre de 33 millimètres de diamètre, dont la force tangentielle développée par l'aimant tournant est mesurée par 110 degrés du micromètre de torsion; cette force n'est plus que de 20 degrés pour un anneau coupé sur ce disque qui a 33 millimètres de diamètre extérieur et 22 millimètres de diamètre intérieur, et se réduit à 14 degrés pour le disque interne. Si l'on avait divisé le disque en deux moitiés, et fait agir séparément chacune de ces moitiés, l'effet serait resté beaucoup plus grand que celui de deux parties du disque coupées circulairement.

C'est principalement sur le disque coupé dans le sens des rayons, que j'ai fait le plus d'expériences; je me bornerai à vous en décrire deux, dont les résultats s'accordent complétement avec ceux obtenus par MM. Herschel et Babbage et qui ont été exécutées avec la méthode de la torsion. J'ai suspendu au fil de torsion (*fig.* 12) un disque de cuivre de $\frac{2}{3}$ de millimètre d'épaisseur et de 52 millimètres de diamètre à la hauteur de 14 millimètres sur

les pôles de l'électro-aimant. Voici les nombres obtenus dans cinq expériences dans lesquelles on a successivement augmenté le nombre des sections.

TABLEAU N° I.

NOMBRE DES SECTIONS diamétrales à égale distance entre elles.	FORCES de torsion.	FORCES rapportées à celle du disque entier prise pour unité.
Disque continu ou 0	318°	1,00
» 2	162	0,51
» 4	78	0,25
» 8	31	0,10
» 16	5 à 6	0,02

Lorsqu'un disque semblable était placé à la hauteur de 10 millimètres des pôles de l'électro-aimant, les nombres trouvés étaient les suivants :

TABLEAU N° II.

NOMBRE DES SECTIONS diamétrales.	FORCES de torsion.	FORCES rapportées à celle du disque entier prise pour unité.
Disque continu ou 0	520°	1,00
» 1	470	0,90
» 2	274	0,53
» 4	132	0,25
» 8	48	0,092
» 16	13 à 14	0,02

Il était important de répéter ces expériences sur des disques de cuivre très-minces et d'un plus petit diamètre ; nous verrons dans la prochaine leçon l'application de ces expériences. J'ai coupé sur une lame de cuivre aussi pure que

j'ai pu la trouver dans le commerce et qui avait $\frac{2}{5}$ de millimètre d'épaisseur, six disques que j'ai rendus très-minces en les tenant un certain temps dans l'acide nitrique. Les six disques de 21 millimètres de diamètre ne pesaient plus que 625 milligrammes ; j'ai couvert ces disques d'une couche d'un mastic résineux et je les ai réunis ensemble en les chauffant légèrement. Le disque composé pesait 1gr,120 et on s'assurait de sa pureté avant de le soumettre à l'action de l'aimant tournant en agissant sur lui avec le pôle d'un électro-aimant fixe. Voici les rapports des forces développées dans ce disque suspendu à la hauteur de 12 millimètres des pôles à un fil simple de cocon, en mesurant la durée de ses révolutions.

TABLEAU N° III.

NOMBRE DES SECTIONS diamétrales du disque.	RAPPORT des forces.
0	1
2	0,44
4	0,13

Les nombres rapportés dans les trois tableaux précédents, dont l'accord avec ceux trouvés par MM. Babbage et Herschel sur des disques de dimensions et de métaux différents de ceux que j'ai employés, permet la généralisation des résultats obtenus, font voir que l'effet de la première section diamétrale pour diminuer la force tangentielle est très-petit ; la diminution devient ensuite proportionnelle au nombre de ces divisions jusqu'à une certaine limite, au delà de laquelle la diminution augmente dans une proportion plus rapide ; ces variations se manifestent

plus tôt lorsque les disques sont formés de lames métalliques plus minces.

Il nous serait impossible, avant de posséder la théorie physico-mathématique des phénomènes du magnétisme par rotation, d'expliquer rigoureusement ces résultats. Évidemment la diminution de la force tangentielle produite par les sections diamétrales des disques ne pouvait être due à la petite quantité de métal enlevée. Dès que la masse métallique soumise à l'aimant tournant n'est plus continue, la forme de la portion soumise à l'induction varie à chaque moment, et la distribution des états électriques et des courants en reste troublée. Il n'est donc plus vrai pour le disque coupé que les systèmes électrodynamiques développés par induction, restent fixes et de forme invariable relativement à l'aimant inducteur, ce qui doit donner lieu à une grande diminution dans l'action réciproque de l'aimant et des courants induits.

Nous allons voir en dernier lieu ces conséquences confirmées par les résultats qu'on obtient en étudiant avec le galvanomètre les courants du disque coupé tournant sur les pôles d'un aimant placés à égale distance de son centre. En se représentant le fil du galvanomètre comme un circuit dérivé appliqué sur deux points du disque, on pouvait s'attendre à trouver une faible diminution dans ces courants par les sections diamétrales du disque ; les courants étant empêchés par ces sections de se décharger dans le disque, auraient dû prendre en plus grande quantité la voie du galvanomètre. Cette conséquence est bien confirmée par l'expérience : si, au lieu d'un disque continu, je prends l'anneau extérieur de ce disque réuni par un seul fil de cuivre à un petit disque laissé au centre, j'obtiens encore des courants très-forts en touchant l'an-

neau et le disque central avec les extrémités du galvanomètre, et je ne trouve pas que ces courants augmentent sensiblement en mettant deux ou trois fils de cuivre au lieu d'un.

Mais je ne devais pas me borner à cette expérience, et il fallait étudier les courants du disque coupé en un certain nombre de secteurs, comme je l'ai fait pour le disque continu.

Rappelez-vous ici qu'en tenant une extrémité du galvanomètre fixe au centre du disque tournant, et l'autre sur les points de ce disque appartenant à une ligne circulaire qui passe normalement sur les centres des pôles inducteurs, les courants sont nuls, tandis qu'ils sont très-forts et de signe contraire en tenant cette seconde extrémité du galvanomètre en dedans ou en dehors de la ligne neutre. Si l'on remplace le disque continu par le disque divisé en un certain nombre de secteurs égaux, on ne trouve plus de ligne neutre, et entre l'extrémité fixe au centre et l'autre qui touche successivement les différents points d'un rayon placé dans le même plan de la ligne polaire, on a des courants qui augmentent d'intensité en allant vers les bords, et qui sont dans la même direction des courants obtenus sur le disque continu entre le centre et la région extérieure de la ligne neutre. En comparant les courants obtenus sur les deux disques, on trouve qu'ils sont moins forts pour le disque coupé en huit secteurs dans les points correspondants à la région intérieure, et plus forts que ceux du disque continu dans les points rapprochés des bords. La forme et l'intensité continuellement variables des systèmes des courants induits, qui passent en contact des extrémités fixes du galvanomètre, nous obligent à considérer les indications de cet instrument dans le cas du disque coupé,

comme des résultats moyens des états électriques variables des points touchés par ces extrémités.

Pour achever cette leçon, je n'ai plus qu'à vous montrer les effets de la réaction que les courants induits, développés dans les masses métalliques tournant en face d'un aimant, exercent sur les forces magnétiques de l'aimant.

L'appareil le plus puissant et le plus propre à ces expériences est le grand électro-aimant (*fig.* 14), sur lequel je fais fonctionner séparément les deux spirales qui l'entourent. Une des spirales conduit le courant d'une pile de 10 à 20 éléments de Grove ; le circuit de l'autre spirale, qui est l'induite, comprend un très-bon galvanomètre à fil court. Je ferme le circuit de la pile, et je laisse passer quelques secondes avant de fermer le circuit de la spirale induite. Remarquez qu'en fermant le circuit induit, même après soixante ou soixante-dix secondes, il y a encore un courant induit dans le même sens que j'aurais obtenu si le circuit induit eût été fermé avant celui de la pile. C'est là la preuve du temps employé par les 100 kilogrammes de fer doux à prendre toute l'aimantation dont ils sont susceptibles. Ce courant est en sens inverse en fermant le circuit induit, après avoir ouvert celui de la pile.

Laissons l'aiguille du galvanomètre revenir à zéro, ce qui ne tarde pas à arriver si les deux spirales sont bien isolées entre elles et si tout est bien en repos autour de l'électro-aimant. Pour vous montrer toute la puissance et la sensibilité de cet appareil, j'approche de l'électro-aimant une aiguille de fer doux de la longueur d'une aiguille à coudre, et vous voyez tout de suite l'aiguille du galvanomètre poussée à 90 degrés, et dans le même sens qu'en fermant le circuit. C'est qu'en effet la présence de l'aiguille de fer doux augmente le magnétisme

de l'aimant, et cette variation donne lieu à un courant induit inverse.

Cet appareil est si puissant, que nous avons des effets très-distincts d'induction en approchant de l'électro-aimant une bouteille remplie de colcothar ou d'une solution ferrugineuse. Notez encore ce qui arrive en approchant de l'électro-aimant un petit barreau d'acier aimanté. Si le pôle approché est de nom contraire, on a un courant comme avec le cylindre de fer doux; mais si l'on approche doucement le pôle de même nom, le courant est en sens contraire d'abord, et il faut approcher davantage le barreau pour voir disparaître la première déviation et reparaître le même courant qu'on avait avec l'autre pôle ou avec le fer. C'est qu'en présence d'une force magnétique si grande, l'aimantation du petit barreau ne tarde pas à être, du moins temporairement, renversée.

Vous concevrez sans peine, d'après la description de cet appareil, comment on peut augmenter notablement les effets de l'induction au moyen de la rotation du corps magnétique en face de l'électro-aimant. Il n'y a pour cela qu'à monter sur l'axe de rotation un commutateur qui comprend le circuit du galvanomètre, et à l'aide duquel le circuit reste fermé pour les deux angles droits dans lesquels le corps soumis à l'induction magnétique s'approche de l'aimant, et ouvert dans les deux angles où il s'éloigne, ou *vice versâ*. Avec cette disposition, les courants qui entrent dans le galvanomètre pendant la rotation du corps sont dans le même sens, et les déviations sont considérablement augmentées et deviennent fixes. En faisant ces expériences avec un barreau de fer doux, on trouve l'effet déjà remarqué, c'est-à-dire que le magnétisme acquis par le fer doux n'arrive à son *maximum* qu'en prolongeant

l'action inductrice pour un certain temps. Ainsi la position favorable du commutateur pour obtenir les courants induits les plus forts n'est pas celle dans laquelle le circuit reste fermé jusqu'à ce que le barreau de fer soit juste dans la ligne polaire ou normalement à cette ligne : il faut pour cela que le commutateur fasse outrepasser un peu ces positions. M. Verdet, qui a fait dernièrement des expériences sur ce sujet, a bien démontré l'influence du temps dans ces phénomènes d'induction magnétiques.

Mais qu'arriverait-il si à la lame de fer doux on substituait une lame de cuivre ou de tout autre métal conducteur et non magnétique? Quoique, par les connaissances acquises, nous soyons dans le cas de répondre à cette question, laissons néanmoins parler l'expérience.

J'approche une lame de cuivre de l'électro-aimant et j'obtiens un courant induit d'une direction opposée à celle du courant que j'avais avec la lame de fer ; je l'éloigne et le courant induit est dans le même sens que celui du courant qu'on avait en approchant la lame de fer : une lame d'étain, de plomb, d'antimoine, de bismuth, etc., donne aussi des courants dans le même sens que la lame de cuivre, mais beaucoup plus faibles. Si l'on emploie la lame de cuivre après l'avoir fendue en plusieurs sens, on voit ces courants diminuer notablement ; ce qui est encore une preuve que ces effets dépendent de la réaction des courants induits sur le magnétisme de l'électro-aimant.

On peut se convaincre encore mieux de cette explication en approchant de l'électro-aimant une spirale plane formée d'un gros fil de cuivre ; dans ce cas, si la spirale est ouverte, il n'y a rien ou presque rien au galvanomètre, mais si elle est fermée, le courant produit dans la spirale induite de l'électro-aimant est très-fort. M. Verdet

a obtenu des effets analogues sans employer l'électro-aimant et en ayant recours à un solénoïde parcouru par un courant voltaïque ; dans ce cas, les courants induits, obtenus en répétant les mêmes expériences, ont été du même sens, mais beaucoup plus faibles que ceux obtenus avec l'électro-aimant, ce qui prouve aussi que la cause principale de la plus grande intensité de ces derniers est due à la réaction des courants induits sur l'aimant.

[illegible]

liques qui n'ont pas une grande épaisseur et qui tournent en présence des pôles, n'est plus si simple que quand il s'agissait du rapprochement et de l'éloignement des grosses lames ; il faut, pour la compléter, se rappeler les systèmes de courants induits sur le disque d'Arago, et prendre en considération leurs déplacements, à mesure que la rotation devient plus rapide.

Je terminerai cette leçon en vous montrant la différence remarquable qu'il y a entre les effets d'un appareil d'induction, suivant qu'on place dans l'intérieur de la bobine ou un cylindre de fer massif ou un faisceau de fils de fer. Cette différence, observée premièrement par M. Bachhoffner et M. Sturgeon, fut analysée plus tard par deux savants physiciens de Berlin, Magnus et Dove. Ce dernier a employé dans cette recherche un inductionomètre différentiel, semblable à celui que nous avons déjà décrit dans la leçon précédente (*fig.* 7 *bis*) ; on place dans une des bobines un cylindre de fer et dans l'autre un certain nombre de fils de ce métal jusqu'à obtenir l'équilibre des deux courants ou des deux décharges induites. Voici les résultats principaux auxquels M. Dove est parvenu. En opérant avec le courant voltaïque, tous les effets des courants induits augmentent avec un cylindre massif ou avec un faisceau de fils de fer qu'on place dans la bobine ; lorsqu'on emploie la décharge électrique de la bouteille de Leyde l'action physiologique des décharges induites diminue avec le cylindre, tandis qu'elle augmente avec le faisceau de fils ; étant parvenu avec un certain nombre de fils de fer à produire un courant induit qui donne la même déviation au galvanomètre que le courant obtenu dans l'autre bobine avec le cylindre de fer, dont le poids est toujours plus grand que celui de fils, ces deux courants formés d'une

quantité égale d'électricité sont néanmoins très-différents pour les effets physiologiques et pour la propriété d'aimanter; pour faire cesser cette différence il faut diminuer davantage le nombre des fils de fer.

Nous n'aurons pas de difficulté à expliquer ces résultats. Je vous ai montré dans cette leçon qu'une masse métallique introduite dans une bobine d'induction ou qu'on fait tourner devant les pôles d'un électro-aimant, est traversée par des courants induits qui réagissent sur l'aimant et sur la spirale induite et produisent un effet contraire à celui qu'on aurait, en substituant une masse de fer ou d'une matière magnétique quelconque. Lorsqu'on a un cylindre de fer dans un appareil d'induction il faut donc s'attendre à trouver que les courants induits dépendront: 1° des variations de l'état magnétique du cylindre, 2° des courants induits développés sur la couche extérieure du cylindre, et qui, malgré leur durée très-courte, agiront, à cause de leur direction, soit au commencement soit à la fin de l'induction, pour retarder la variation de l'état magnétique du fer et auront aussi une action semblable à celle d'une lame métallique qu'on place en contact d'une spirale induite. Si, au lieu du cylindre, on emploie un faisceau de fils de fer, les courants induits ne peuvent plus exister, et les variations de l'état magnétique du fer cessent d'être contrariées par ces courants.

Il y a encore une autre cause de la différence trouvée entre le cylindre et les fils de fer. Nous avons déjà vu que si l'on ferme avec le galvanomètre la spirale induite d'un électro-aimant, même longtemps après avoir fermé le circuit voltaïque, on a encore des signes du courant induit négatif, et qu'on obtient le même résultat ou le courant positif plus ou moins fort, en fermant la spirale induite après

avoir ouvert le circuit de la pile. Cet intervalle de temps, qui est nécessaire pour que l'état magnétique du fer arrive à son maximum, est de plusieurs secondes et augmente avec la quantité du fer à aimanter. Or, il est très-facile de s'assurer en faisant l'expérience avec la même bobine et avec le même courant, qu'un faisceau de fils de fer atteint l'état d'équilibre magnétique beaucoup plus rapidement qu'un cylindre de fer : dans quelques expériences, j'ai trouvé que le premier s'aimantait huit à dix fois plus vite que le second.

Rappelons encore les principes déjà exposés dans la première leçon en parlant de l'influence des lames métalliques interposées entre les deux spirales d'un appareil d'induction. Nous avons remarqué alors, en se fondant sur l'analogie qui passe entre la décharge de la bouteille de Leyde et les courants induits, que la neutralisation de quantités égales de fluides électriques peut exciter des secousses musculaires et des aimantations plus ou moins fortes, suivant la durée de cette neutralisation. On a vu aussi que si l'on imagine un circuit métallique parcouru par un courant induit, dans lequel se succèdent presqu'en même temps deux courants induits égaux d'un ordre supérieur, mais dont le premier est plus intense et dirigé en sens contraire, l'action galvanométrique et électrolytique de ce circuit restera la même, comme si ces deux courants n'existaient pas, car la somme de l'électricité transmise n'a pas changé ; au contraire, la secousse et l'aimantation seront affaiblies, parce que la durée de la neutralisation de l'électricité induite est devenue plus longue.

Il faut donc que la secousse et l'aimantation des courants induits développées avec un faisceau de fils de fer dans la bobine soient plus intenses que celles de ces

mêmes courants obtenus en remplaçant le faisceau par un cylindre massif. On conçoit également pourquoi, lorsque le courant inducteur n'est qu'instantané, comme la décharge de la bouteille, l'effet des courants induits dans le cylindre de fer l'emporte sur celui de la variation de son état magnétique, ce qui fait qu'on ne gagne pas d'intensité dans les courants induits en plaçant ce cylindre dans l'intérieur de la bobine.

QUATRIÈME LEÇON.

De l'action de l'aimant tournant sur les corps magnétiques et sur ceux qui ne sont ni magnétiques ni conducteurs.

Je me propose de vous montrer, dans la première partie de cette leçon, que l'induction de l'aimant tournant sur les corps magnétiques donne lieu à des effets semblables à ceux que nous venons d'étudier, et qui résultent de l'action réciproque entre un aimant inducteur et les courants induits dans les masses métalliques.

Rappelons d'abord, le plus sommairement possible, les propositions fondamentales et les définitions élémentaires de la science du magnétisme.

Nous appelons *corps aimanté* celui qui, étant suspendu par son centre de gravité et libre de tourner autour de ce point, n'est jamais en équilibre que lorsqu'une certaine ligne qui le traverse, généralement dans le sens de sa longueur, est dirigée par l'action de la terre dans un plan déterminé; ce corps flottant sur l'eau n'acquiert par cette action aucun mouvement horizontal et n'éprouve la moindre variation dans son poids s'il est attaché au plateau d'une balance. On appelle *axe magnétique* la ligne

de l'aimant qui obéit au magnétisme de la terre et qui trace la direction de la force magnétique totale à laquelle est assujetti chaque point de la surface terrestre. Dans un aimant de forme allongée et dont l'axe magnétique est dans la direction de sa longueur, les extrémités de cet axe sont appelées *pôles magnétiques*, qui rappellent ceux des pôles terrestres vers lesquels ils se dirigent : suivant l'usage des auteurs français, je me suis servi dans ces leçons des mots *pôle sud* ou *austral* pour celui qui se dirige vers le *nord*, et *pôle boréal* ou *nord* pour celui qui se tourne vers le *sud*. Lorsqu'on approche deux barreaux aimantés uniformément dans le sens de la longueur, les forces qui se développent et qui paraissent émaner des pôles, varient réciproquement avec les carrés des distances de ces pôles, et les mouvements qui en résultent sont attractifs si les pôles approchés sont de nom contraire, et répulsifs s'ils sont de même nom. Un aimant ou un courant électrique agissent par *induction* sur certains corps, parmi lesquels le fer occupe la première place, et communiquent aux corps ainsi magnétisés par induction toutes les propriétés de l'aimant. L'intensité du magnétisme développé par induction augmente, jusqu'à une certaine limite, avec celle de la force inductrice, et dépend de la nature du corps induit. On dit que l'acier a une *force coercitive* très-grande et que le fer doux n'en a pas, parce que ces deux corps, soumis à la même action inductrice, acquièrent et conservent des états magnétiques différents ; l'acier est magnétisé à un degré moindre que le fer doux, mais celui-ci perd entièrement son magnétisme, une fois soustrait à l'action de l'aimant. L'induction magnétique n'est pas développée instantanément, et le temps nécessaire pour qu'un corps acquière ou perde le degré de ma-

gnétisme dont il est susceptible sous l'action d'une force inductrice donnée, paraît varier avec la force coercitive.

Suivant Coulomb, chaque molécule d'un corps magnétique contient deux *matières* ou *fluides magnétiques* qui, lorsqu'ils sont libres, se repoussent ou s'attirent mutuellement, suivant qu'ils sont de la même nature et de même nom ou de nom contraire. L'induction sépare les fluides contraires combinés dans chaque molécule, et oblige ces fluides à se transporter aux extrémités des molécules sans jamais en sortir. La théorie mathématique du magnétisme, qui est fondée sur l'hypothèse de Coulomb, a pu être ensuite appliquée aux corps isolants sujets à l'induction électrique, ce qui nous prouve que l'induction moléculaire électrique et l'induction magnétique, malgré les grandes différences des circonstances physiques dans lesquelles elles se produisent, ont des analogies intimes dans leur mécanisme. Dans l'hypothèse d'Ampère, l'état magnétique d'un corps est dû à des courants électriques moléculaires, et un aimant n'est qu'un assemblage régulier de ces courants ayant la même action qu'un solénoïde.

Ces principes rappelés, passons maintenant à étudier les effets de l'aimant tournant sur les corps magnétiques.

Imaginons d'avoir un aimant placé verticalement avec son pôle supérieur à proximité d'une lame très-étendue, formée d'une matière magnétique. Le pôle de l'aimant développe par induction, dans les points les plus rapprochés de la lame, un état magnétique contraire, dont le *maximum* se trouve immédiatement dans le prolongement de l'axe de l'aimant, et répand autour de ces points une zone annulaire d'un magnétisme plus faible du même nom. Supposons que l'aimant soit mis en mouvement

horizontalement, restant toujours à la même distance de la lame. Comme l'induction magnétique exige un certain temps pour se développer, il en résulte que les différents points de la lame, qui successivement correspondent verticalement au pôle, n'arrivent pas au *maximum* du magnétisme contraire dont ils sont susceptibles au moment de leur plus grand rapprochement. De la même manière, les points de la lame que le pôle laisse derrière lui dans son mouvement, ne pouvant perdre leur état magnétique qu'après un certain temps, conservent le *maximum* de cet état, même après que ce pôle s'en est éloigné d'une très-petite distance. Ces deux causes réunies contribuent à former sur la lame, derrière le pôle en mouvement, une zone plus étendue et d'un état magnétique contraire plus intense que celle qui existe au devant de ce pôle, et font que le *maximum* du magnétisme induit dans la lame ou le pôle contraire, n'est pas verticalement sur l'autre, mais un peu en arrière. Il en résulte donc entre les deux pôles une force oblique dont la composante parallèle sollicite la lame magnétique à suivre l'aimant, si cette lame est libre de se mouvoir dans son propre plan.

Pour vous montrer cette action de l'aimant en mouvement sur une lame de matière magnétique, je suspends un disque de cette matière par son centre à un fil de cocon sur l'électro-aimant (*fig.* 12), que nous avons employé dans la leçon précédente. Comme le temps nécessaire pour que les états magnétiques développés par induction se détruisent est toujours très-court, ce qui rend très-petit l'espace du disque possédant la polarité contraire au pôle inducteur, l'électro-aimant tournant avec une vitesse modérée sollicitera continuellement le disque dans la direction de la tangente à la courbe qu'il décrit, et l'obligera à

tourner autour du centre même de sa rotation. Évidemment ces mêmes considérations s'appliquent à un disque de matière magnétique qui tourne sous une aiguille aimantée et l'entraîne avec lui.

Pour mesurer la force qui se développe dans un disque de matière magnétique soumis à l'aimant tournant, nous pouvons employer la balance de torsion, comme nous l'avons fait pour le disque de cuivre. Voici un disque formé d'un mélange homogène de parties égales de cire et de colcothar, suspendu horizontalement par son centre au fil d'argent qui coïncide avec l'axe de rotation de l'électro-aimant. En donnant à l'électro-aimant une rotation uniforme, il faut tourner le micromètre de la balance d'un certain nombre de degrés pour ramener le disque en équilibre à sa position primitive. Dans cette situation, la force tangentielle qui s'exerce entre les pôles de l'électro-aimant et les pôles contraires continuellement développés par induction dans les différents points du disque, fait équilibre à la force de torsion qui tend sans cesse à ramener le disque à son point de départ.

Un disque ou une sphère de fer doux se comportent comme le disque de colcothar, mais avec une intensité plus grande.

Il faut rapporter à cette même classe de phénomènes ceux découverts par M. Barlow très-peu de temps après les premières expériences d'Arago sur le magnétisme par rotation. Dans les expériences de M. Barlow, c'est la terre qui est l'aimant inducteur, et le corps induit est une sphère de fer doux, qui tourne autour d'un axe incliné d'une manière quelconque avec l'aiguille d'inclinaison. Quand la sphère est en repos, nous savons que le magnétisme de la terre y développe par induction deux pôles de

nom contraire placés aux extrémités d'un diamètre parallèle à l'aiguille d'inclinaison. La position de ces pôles ne serait pas altérée en faisant tourner la sphère avec une certaine vitesse, si l'induction magnétique n'exigeait pas un certain temps pour se développer; mais, comme il n'en est pas ainsi, on conçoit que les pôles doivent se déplacer dans le sens du mouvement de la sphère, que la quantité de ce déplacement sera la plus grande possible lorsque l'axe de rotation est perpendiculaire au méridien magnétique, et qu'elle deviendra nulle en faisant tourner la sphère autour d'un axe parallèle à l'aiguille d'inclinaison.

Nous déduisons facilement des principes exposés, l'explication des effets produits par un disque d'acier plus ou moins trempé qu'on fait tourner sous une aiguille aimantée. M. de Haldat a trouvé que la déviation de cette aiguille diminuait à mesure que la trempe de l'acier était plus dure. Ce physicien avait cru que l'aiguille ne ressentait plus l'influence de l'acier trempé au plus haut degré. Il faut dire que cette influence n'est que diminuée; car, en employant un électro-aimant, on peut faire tourner un disque d'acier d'une trempe très-dure et qui n'a aucune action sensible lorsqu'il est réduit à un disque tournant sous une aiguille aimantée. A mesure que la force coercitive augmente dans la matière soumise à l'aimant tournant et que la vitesse de rotation de l'aimant devient plus grande, les états magnétiques développés par induction doivent nécessairement s'affaiblir; alors chacun des pôles ne trouve plus devant lui des points du disque retournés à l'état naturel et ne laisse plus derrière lui un pôle contraire; il peut même arriver que, pendant une révolution entière de l'électro-aimant, l'induction dans chaque

point du disque n'ait eu le temps ni de se développer ni de cesser entièrement. Je puis vous montrer une expérience qui rend ces déductions évidentes. Je suspends à un fil de cocon un disque de carton sur la périphérie duquel j'ai fixé des aiguilles d'acier avec leur axe vertical et ayant les pôles de même nom dirigés du même côté. Si je fais tourner rapidement un disque de fer doux au-dessus du disque de carton, l'action est nulle ou très-faible.

On conçoit également, à l'aide des principes que nous avons appliqués à l'explication des phénomènes du magnétisme par rotation des corps ferrugineux, qu'il peut exister de ces corps incapables d'éprouver l'action de l'électro-aimant tournant par défaut du pouvoir coercitif : tel est le cas des dissolutions concentrées de protosulfate et de protochlorure de fer et de ces composés à l'état solide. En effet, des boules de verre remplies de ces dissolutions ou de ces composés solides, suspendues à un fil de cocon sur l'électro-aimant tournant, n'acquièrent aucun mouvement de rotation et font seulement quelques oscillations dont l'amplitude diminue en donnant à l'électro-aimant une plus grande vitesse de rotation. De même j'ai trouvé, en faisant osciller une aiguille aimantée horizontale sous une couche d'une de ces dissolutions, que le nombre des oscillations faites pour diminuer l'amplitude d'un certain arc était le même que sous une couche d'eau pure. Nous verrons tout à l'heure des mélanges formés d'acide stéarique et d'une très-petite quantité de colcothar, fortement doués du pouvoir de tourner avec l'électro-aimant, quoique leurs propriétés magnétiques fussent nulles ou très-faibles. Au contraire, les boules de verre remplies de sulfate ou de chlorure de fer sont fortement magnétiques. Il est facile de vous montrer que ces sels ferrugineux n'ont

pas un pouvoir coercitif sensible, tandis que l'oxyde de fer en est doué. Je prends un tuyau de plume d'oie que je remplis de colcothar, et je le suspends horizontalement entre les pôles d'un électro-aimant. J'emploie, pour fermer le circuit, un commutateur à l'aide duquel je puis intervertir très-promptement le sens du courant, et, par conséquent, les pôles. Aussitôt que le circuit est fermé, on voit l'aiguille de colcothar fortement attirée dans la ligne polaire. Si alors je tourne promptement le commutateur, l'aiguille éprouve d'abord un mouvement de répulsion, s'arrête de nouveau dans la ligne polaire, et, dans le plus grand nombre de cas, la position de ses extrémités relativement aux pôles se trouve renversée. Une aiguille formée d'un mélange de cire et de colcothar se comporte de la même manière, et l'on trouve, après plusieurs jours, qu'elle a conservé la polarité acquise sous l'action de l'aimant. Les dissolutions ferrugineuses et les composés de fer que je vous ai nommés, n'offrent rien de semblable. Ainsi, des tubes de verre ou de plume d'oie remplis de ces dissolutions ou de corps solides obtenus par l'évaporation de ces dissolutions, sont fortement attirés dans la ligne polaire lorsque le circuit de l'électro-aimant est fermé, mais ils ne donnent aucun signe de répulsion lorsqu'on renverse brusquement les pôles.

Je crois utile de vous faire remarquer ici qu'un aimant tournant avec une grande rapidité ne peut jamais produire un mouvement de rotation dans un autre aimant. En effet, imaginons une sphère d'acier qui ait été aimantée et qu'on approche de l'aiguille d'une boussole; nous savons que des mouvements différents se produisent dans l'aiguille, suivant les noms des pôles de la sphère et de l'aiguille qui sont rapprochés, et suivant la distance qui

existe entre ces pôles. Si nous donnons à cette sphère un mouvement très-rapide de rotation autour de son centre, on conçoit que les actions de ses pôles doivent se neutraliser; on verrait alors l'aiguille revenir à sa position naturelle, ou du moins ne s'en écarter que pour faire de petites oscillations dont les amplitudes diminuent à mesure que la sphère tourne plus vite, et deviennent insensibles quand on lui imprime une vitesse très-grande de rotation. Pour rendre évidente cette conclusion, dont nous verrons bientôt une application importante, je fixe un certain nombre de barreaux aimantés sur les contours d'un disque de bois horizontal, qui peut tourner rapidement autour de son centre. Je suspends au milieu de ce champ magnétique une sphère de cire qui a été préparée, en fixant, suivant les rayons de son grand cercle qui reste horizontal, de petites aiguilles d'acier fortement aimantées. Nous pouvons faire l'expérience en disposant les pôles de ces aiguilles de deux manières différentes, c'est-à-dire que nous pouvons placer à l'extérieur de la sphère les pôles de même nom et à la même hauteur que ceux des barreaux du disque, ou bien mettre en présence les pôles de nom contraire; nous pouvons aussi fixer les aiguilles seulement sur un demi-cercle ou sur un quart de cercle de la sphère. Avec ces différentes dispositions, lorsqu'on fait tourner rapidement le disque, on voit la sphère décrire de petites oscillations qui diminuent d'amplitude à mesure que la vitesse de rotation du disque devient plus grande.

J'appellerai maintenant votre attention sur les effets éprouvés par des mélanges composés avec des proportions différentes de cire ou d'acide stéarique et de sesquioxyde de fer sous l'action de l'aimant tournant. Je fais

avec ces mélanges des sphères qui pèsent 1 gramme et qui sont suspendues, sur l'électro-aimant (*fig.* 12), à un fil de cocon. En mesurant les forces développées par l'aimant tournant avec les méthodes que nous avons décrites dans la leçon précédente, on est d'abord frappé de trouver que ces forces diminuent beaucoup moins rapidement que les quantités de colcothar qui entrent dans ces mélanges, par rapport au poids total des sphères.

En diminuant considérablement la quantité de colcothar mêlée à l'acide stéarique jusqu'à $\frac{1}{2000}$ du poids de cet acide, ce qui ne laisse qu'un demi-milligramme répandu uniformément dans la sphère, on trouve néanmoins ce mélange doué de la propriété de tourner avec l'électro-aimant. Si la sphère formée avec ce mélange est suspendue à un fil simple de cocon, et si son point inférieur n'est qu'à 3 ou 4 millimètres de hauteur de la surface des pôles, on la verra faire plusieurs révolutions dans le sens de la rotation de l'électro-aimant, qui fait cinq à six tours par seconde. J'ajouterai qu'en doublant, et même en triplant la quantité d'acide stéarique, le nouveau mélange jouit encore de la propriété de tourner avec l'électro-aimant.

Remarquez maintenant que ces derniers mélanges ne se comportent pas, en présence de l'aimant, comme des corps magnétiques; bien au contraire : si j'en forme une aiguille que je suspends entre les pôles d'un électro-aimant, ou si la sphère même est suspendue en face de ces pôles, étant fixée à l'extrémité d'une tige horizontale de bois, je vois que ces mélanges se conduisent comme des corps *diamagnétiques*. Vous comprendrez cette propriété, si je vous dis que l'acide stéarique est un corps repoussé par l'aimant, et que le pouvoir diamagnétique des quantités d'acide stéarique contenues dans nos sphères n'est

pas neutralisé par le pouvoir contraire de la petite quantité d'oxyde de fer avec laquelle l'acide est uniformément mêlé. Nous verrons dans la prochaine leçon qu'il faut mêler 300 parties d'acide stéarique à 1 de colcothar obtenu en calcinant le sulfate de fer, pour produire un mélange sensiblement indifférent à l'action de l'aimant. Concluons donc que l'aimant tournant peut agir sur certains corps qui sont isolants, et qui ne sont pas attirés par l'aimant, de la même manière que sur les corps conducteurs et sur les magnétiques.

Ajoutons encore une autre expérience, et cette conclusion sera encore plus claire. Je soumets à l'action de l'électro-aimant tournant une sphère formée d'acide stéarique chimiquement pur, ou une boule de verre très-mince remplie de phosphore, qui est un corps beaucoup plus diamagnétique que l'acide stéarique. Ni l'une ni l'autre de ces sphères ne tourne avec l'électro-aimant. J'ai répété ces expériences en employant un électro-aimant tournant très-puissant, dont les extrémités polaires en fer doux, tournaient avec l'électro-aimant. Les sphères d'acide stéarique et de phosphore, qui étaient suspendues à un fil simple de cocon dans un tube de verre entre les extrémités polaires, n'ont jamais fait une révolution entière lorsque l'électro-aimant était en rotation, et n'ont montré que de petites oscillations dont l'amplitude a diminué avec la rapidité de la rotation, et qui sont dues à quelque dissymétrie dans la distribution des forces magnétiques, ou dans la forme et l'homogénéité des sphères. Toutes ces expériences font voir que l'action de l'aimant tournant sur les mélanges d'acide stéarique et d'oxyde de fer ne s'exerce que sur la matière magnétique; que cette action a lieu également quand

cette matière est mêlée uniformément avec un excès d'un corps diamagnétique donnant au mélange la propriété d'être repoussé par l'aimant, et qu'enfin le pouvoir diamagnétique ne communique pas au phosphore et à l'acide stéarique la propriété de tourner avec l'électro-aimant.

Passons maintenant à étudier les phénomènes du magnétisme de rotation développés dans des corps isolants et entièrement privés de toute matière magnétique.

C'est encore Arago qui, après la découverte de l'action du disque tournant sur l'aiguille aimantée, a fait osciller cette aiguille sur de l'eau, sur un plan de verre et sur l'eau gelée, et a trouvé que ces corps influent sur ces oscillations de la même manière, mais beaucoup plus faiblement que les métaux. Dans une expérience, la distance de la face inférieure de l'aiguille à l'eau gelée était de $0^{mm},70$, et, en descendant de 53 à 43 degrés, l'aiguille a fait 26 oscillations. En augmentant successivement les distances, le nombre des oscillations est allé en augmentant, et, à la distance de $52^{mm},2$, l'aiguille a fait 60 oscillations.

Il est donc impossible de mettre en doute l'existence de l'action de l'aimant en mouvement sur des corps qu'on peut considérer purs de fer et non conducteurs.

M. Harris a répété les expériences d'Arago en faisant osciller l'aiguille dans un espace d'air raréfié, et il a trouvé que différents bois et le marbre statuaire agissent aussi d'une manière distincte sur les oscillations de l'aiguille. J'ai trouvé la même propriété dans la gomme laque, le soufre, l'acide stéarique et la gutta-percha.

Comment faut-il interpréter l'influence de ces corps isolants non magnétiques sur l'aiguille? Est-elle de la

même nature que celle qui est développée par le disque métallique tournant? Pourquoi certains corps isolants, qui sont fortement repoussés de l'aimant, n'éprouvent-ils pas des effets analogues à ceux du magnétisme par rotation? Faut-il admettre dans les phénomènes diamagnétiques l'influence d'un pouvoir coercitif analogue à celui des corps ferrugineux?

Les expériences nous manquaient entièrement pour répondre à ces questions. Si l'on admet que, par la méthode des oscillations d'Arago, les effets de l'action très-faible qui se développe entre l'aiguille en mouvement et certains corps isolants et non magnétiques, peuvent s'accumuler et devenir sensibles, on devait chercher à obtenir sur ces corps les autres effets du magnétisme par rotation, soit en augmentant la puissance de l'aimant tournant, soit en variant convenablement leur composition.

J'ai réussi à faire tourner dans le sens de l'électro-aimant des mélanges homogènes qui étaient formés de poudres métalliques chimiquement pures à l'état de grande division et d'une matière isolante qui était ou la colophane ou l'acide stéarique. Pour obtenir des poudres métalliques dans cet état, je décompose avec un courant voltaïque très-fort les dissolutions salines de certains métaux qui ont été purifiées avec tous les soins possibles. Ainsi, pour avoir du cuivre très-divisé, je prends une dissolution de sulfate de cuivre qui a été purifiée en y faisant passer du chlore pour convertir en peroxyde le fer qui peut y exister; je la filtre après, j'ajoute un excès d'ammoniaque, je la filtre de nouveau, et enfin je la neutralise avec de l'acide chlorhydrique. Je décompose cette dissolution en employant pour électrodes des lames de platine ou de cuivre obtenu avec la galvanoplastique. De temps en temps, je re-

tire l'électrode négative du liquide pour faire tomber dans l'eau la poudre de cuivre qui s'est déposée sans agrégation. La poudre ainsi obtenue est recueillie sur un filtre, lavée avec l'eau et enfin chauffée avec la flamme de la lampe à alcool dans un tube de verre au milieu d'un courant de gaz hydrogène sec.

Je remplis un petit tube de plume d'oie de cette poudre et je le suspends à un fil de cocon entre les pôles de l'électro-aimant : en fermant le circuit, on voit le tube, repoussé des pôles, faire un certain nombre d'oscillations et s'arrêter comme le ferait une aiguille diamagnétique dans un plan perpendiculaire à la ligne polaire. De même, si je fixe à l'extrémité d'un levier très-léger en ivoire un petit flacon rempli de cette poudre de cuivre en face des pôles de l'électro-aimant, le flacon est repoussé au moment où l'action de l'aimant commence, et s'arrête en équilibre à une certaine distance des pôles.

J'ai fait mesurer par un habile micrographe les dimensions des particules de cette poudre de cuivre, et l'on a trouvé que les moins fines avaient $\frac{1}{100}$ de millimètre et les plus fines à peu près $\frac{1}{200}$; pour le plus grand nombre de particules, ces dimensions étaient de $\frac{1}{140}$ à $\frac{1}{150}$ de millimètre. On a remarqué que ces poudres étaient formées de petits solides de forme irrégulière, qui devenaient transparents après avoir été exposés à l'air pendant un certain temps, et présentaient alors dans leur caractère physique des analogies avec la poudre d'hydrocarbonate de cuivre ou *bleu de montagne*.

Quand j'ai voulu séparer la poudre de cuivre ainsi obtenue en deux ou trois portions de finesse différente, formées de particules le plus semblables possible, j'ai appliqué à ces poudres le procédé de bocardage. J'ai préparé

la poudre d'argent en décomposant avec la pile le nitrate dissous dans l'eau. La poudre de bismuth a été obtenue en broyant ce métal dans un mortier de marbre et en le tamisant après avec des toiles très-fines. Voici maintenant comment je forme les sphères ou les disques avec des mélanges de ces poudres métalliques et de la colophane. Après avoir choisi de la résine pure et m'être assuré de son diamagnétisme, je la liquéfie dans une cuiller d'argent et j'y mêle promptement la poudre métallique. Pour rendre le mélange bien homogène, et pour le chauffer le moins possible, je le remue avec une lame d'argent qui a été chauffée. Le mélange étant bien formé, on le manie rapidement pour lui donner la forme de la sphère ou du disque. Les sphères et les disques que j'ai généralement employés pesaient de 1 gramme à 1gr,200 et avaient de 12 à 20 millimètres de diamètre ; j'employais pour les suspendre un fil simple de cocon de la longueur de 1 mètre et qui était rompu par un poids de 6 à 7 grammes.

Afin de m'assurer du pouvoir isolant des mélanges de résine et de poudre métallique, j'ai mis en contact des deux surfaces d'une lame très-mince de ce mélange les extrémités du circuit d'une pile de 10 éléments de Grove, dans lequel se trouvait un galvanomètre très-délicat. On obtenait cette lame aussi mince que possible en ramollissant le mélange avec la chaleur, et en le tirant avec les mains. Si l'expérience est faite avec soin, c'est-à-dire en tenant isolées de la terre toutes les parties métalliques de ce circuit, *la déviation de l'aiguille est nulle.*

Avant de soumettre ces mélanges à l'aimant tournant, je m'assure qu'ils sont diamagnétiques, avec les deux procédés que j'ai déjà décrits.

Quand les sphères ou les disques faits avec des mé-

langes de résine et de poudre métallique ont été trouvés isolants et diamagnétiques, je les suspends au fil de cocon sur l'électro-aimant (*fig.* 12) à des distances entre leurs points inférieurs et la surface des pôles qui ont varié de 4 à 10 millimètres. De petits signes formés avec des morceaux de papier fixés sur ces sphères ou sur le bord des disques, sont observés avec une lunette. Après avoir mis en rotation l'électro-aimant, je ferme le circuit de la pile et je fais marcher le chronomètre. La rotation des sphères ou des disques ne tarde pas à se manifester, et l'on peut noter plusieurs révolutions, qui d'abord augmentent de rapidité, restent ensuite uniformes et enfin deviennent de plus en plus lentes. En continuant la rotation de l'électro-aimant, la sphère se fixe et le fil de cocon reste tordu d'un certain nombre de circonférences; en effet, si on cesse de tourner ou si on ouvre le circuit, on voit le corps suspendu faire un certain nombre de révolutions en sens contraire et s'arrêter à un point qui généralement ne coïncide pas tout à fait avec le point primitif d'équilibre et indique un certain déplacement du fil dans le sens de la torsion.

La force qui sollicite les sphères ou les disques à tourner avec l'électro-aimant est assez grande pour qu'on parvienne à détruire et à renverser le premier mouvement en donnant à l'électro-aimant la rotation contraire.

Pour dissiper toute espèce de doute sur l'existence de quelque trace de matière magnétique dont la présence aurait été cachée dans ces mélanges par le pouvoir diamagnétique de la résine, comme cela arrive avec les mélanges d'acide stéarique et de colcothar, j'ai oxydé les poudres métalliques de cuivre et de bismuth, et j'ai soumis les oxydes à l'électro-aimant tournant; l'action a été nulle et je n'ai observé que quelques oscillations sem-

blables à celles du phosphore et de l'acide stéarique.

Ainsi donc, nous pouvons tirer de toutes ces expériences, que j'ai cru nécessaire de vous décrire minutieusement, la conclusion suivante : *des mélanges homogènes isolants et diamagnétiques, formés de colophane et de poudre de cuivre, dont les particules ont à peu près* $\frac{1}{150}$ *de millimètre de dimension, éprouvent l'action de l'électro-aimant tournant, comme les corps conducteurs et les corps magnétiques, et n'en diffèrent que par des effets beaucoup plus faibles.*

J'ai fait osciller des disques ou des sphères de ces mélanges, suspendus avec un fil de cocon, en présence des pôles d'un électro-aimant puissant, et j'ai trouvé, comme dans l'expérience fondamentale d'Arago, des différences marquées et constantes dans le nombre des oscillations que ces corps faisaient pour descendre d'un certain nombre de degrés.

L'influence sur les oscillations de l'aiguille et la propriété de tourner avec l'électro-aimant ont toujours été plus grandes pour le mélange de poudre de cuivre que pour celui de bismuth.

J'ai enfin recherché si, en faisant tourner ces mélanges en face de l'électro-aimant, on obtenait des phénomènes semblables à ceux produits par une lame métallique. Vous avez vu, à la fin de la leçon précédente, qu'en faisant tourner une lame de matière magnétique en face des pôles d'un électro-aimant, on obtenait des signes très-forts d'induction, et qu'avec une lame de cuivre les courants induits étaient de sens contraire. J'ai donc fait tourner avec le même appareil une lame formée de fragments très-minces de cuivre obtenus par la galvanoplastique, isolés entre eux par une couche de résine ; le poids moyen

de chacun de ces fragments n'excédait pas 2 à 3 milligrammes. Le courant induit obtenu était constant et de 8 à 10 degrés au galvanomètre très-délicat déjà employé dans des expériences semblables sur des lames métalliques continues: ce courant était dans le même sens qu'avec ces lames et augmentait avec la vitesse de rotation. En remplaçant les morceaux de cuivre par des cylindres de bismuth qui avaient 4 à 5 millimètres de diamètre et de hauteur, j'ai obtenu encore des effets d'induction dans le même sens et très-distincts, quoique plus faibles. Je n'ai pu obtenir des signes constants et assez marqués d'induction en opérant avec les mélanges formés de poudre métallique très-fine et de résine.

Comment doit-on interpréter les phénomènes du magnétisme de rotation produits dans des corps isolants et privés de matière magnétique? quelle est l'influence que l'état de division du métal qui entre dans ces corps exerce sur ces phénomènes? y a-t-il une relation entre la cause de ces phénomènes et celle du diamagnétisme, et si cette relation existe, quelle en est la signification physique?

Voilà les questions principales qui sont soulevées par les résultats des expériences que je vous ai décrites; quoique préocupé depuis longtemps de leur solution, j'ai à peine l'espérance de pouvoir vous en donner les premiers éléments. L'idée qui se présente d'abord à l'esprit pour expliquer le magnétisme de rotation des mélanges de résine et de cuivre très-divisé, et qu'il fallait examiner premièrement, est celle de considérer les petites particules métalliques de ces mélanges sujettes à l'action de l'aimant tournant, comme les secteurs du disque coupé et produisant ainsi des effets dont l'intensité serait propor-

tionnelle à la quantité de la matière et au degré de sa division.

Je ne m'arrêterai pas dans cet examen à des remarques qui ne pourraient inspirer aucune confiance, sur les effets comparatifs des forces développées par l'aimant tournant dans des circonstances très-différentes, et mesurés dans un cas par la torsion du fil d'argent et dans l'autre par la durée des révolutions du corps suspendu au fil de cocon. Coulomb, dans un de ses célèbres Mémoires, a bien donné un nombre qui exprime la force de torsion d'un fil de cocon ; mais pour en déduire le rapport qui existe avec le nombre qui exprime la force de torsion d'un fil d'argent, il fallait supposer que les lois de la torsion trouvées sur les fils métalliques pussent s'étendre également aux fils de cocon, ce qui est loin d'être vérifié par les expériences même les plus élémentaires. On ne pourrait pas non plus se fier au résultat d'une expérience directe, que je n'ai cependant pas manqué de faire, en soumettant à l'action du même aimant tournant un petit disque de cuivre, suspendu, dans un cas à un fil d'argent très-long, et dans l'autre à un fil comme on l'obtient du cocon, mais pris très-court, afin d'obtenir dans ce disque deux déviations fixes et comparables. Le fil d'argent, qui est celui que j'ai employé dans ma balance de torsion, a 102 centimètres de longueur, et celui de cocon 4 millimètres ; les déviations fixes du disque ont été de 6 degrés $\frac{1}{2}$ avec le premier fil et de 335 degrés avec le second. En appliquant la loi de la longueur des fils, ce qui ne peut pas se faire rigoureusement, comme nous l'avons déjà dit, la force de torsion trouvée dans le fil d'argent serait *treize mille fois* plus grande que celle du fil de cocon.

Voyons maintenant à quelle conséquence on arrive en tenant compte de l'influence de la division.

Un disque de cuivre qui pèse 1gr,400 et qui a 20 millimètres de diamètre suspendu au fil de torsion convenablement tendu par un cylindre de soufre, est sollicité, sous l'action de l'aimant tournant, à la distance de 4 millimètres des pôles par une force mesurée par 8 degrés du micromètre. Si on fait sur ce disque des sections diamétrales, nous obtiendrons une diminution dans la force développée par l'électro-aimant, et nous avons vu dans la leçon précédente que cette diminution varie avec le nombre de ces divisions jusqu'à une certaine limite, au delà de laquelle la diminution augmente dans une proportion plus rapide. Nous avons vu aussi que cette proportion est encore plus rapide si l'on opère sur des disques faits avec des lames métalliques plus minces. Prenons un disque formé d'un mélange homogène de poudre de cuivre très-divisée et de résine, suspendu à un fil simple de cocon à la même hauteur des pôles de l'électro-aimant tournant : ce disque, qui contient 700 milligrammes de poudre de cuivre, c'est-à-dire la moitié du poids du premier disque, fait plusieurs révolutions ; et si l'aimant continue à tourner, il s'arrête à une nouvelle position d'équilibre dans laquelle son fil de suspension reste tordu de plusieurs circonférences.

Si l'on réfléchit que les 700 milligrammes de cuivre sont formés de particules de $\frac{1}{150}$ de millimètre, qui par conséquent sont distribuées au nombre de plusieurs millions dans ce disque, dont l'épaisseur est triple de celle du disque de cuivre, on est forcément conduit à la conclusion suivante : puisque les effets développés dans un disque de cuivre par l'aimant tournant diminuent, dans un certain rapport, avec le nombre de ses sections, si l'on admet qu'en poussant très-loin la division, la diminution continue dans un rapport comparable à celui qu'on trouve lorsque cette

division est encore très-limitée, il est évident que la force qui produit la rotation du disque continu *ne pourrait exercer aucune action* sur les mélanges de résine et de poudre de cuivre ou de bismuth très-divisés.

Mais le secours d'expériences directes ne m'a pas manqué pour démontrer que, dans un mélange de résine et d'une poudre métallique dont les particules ont déjà de très-petites dimensions, l'effet de l'aimant tournant diminue par la division ultérieure de ces particules dans une proportion d'autant moindre que cette division est plus grande.

Je ne crois pas nécessaire de vous décrire toutes les expériences très-nombreuses par lesquelles j'ai démontré cette proposition, et je me bornerai à celles que je crois les plus propres à la rendre évidente.

Vous avez vu dans la leçon précédente que la force développée par l'aimant tournant dans un disque se réduisait à la moitié si le disque était coupé en quatre secteurs, à un quart si ces secteurs étaient huit, à un dixième avec seize secteurs, et enfin à deux centièmes quand le nombre des secteurs était trente-deux. J'ai préparé deux disques avec des morceaux de fil de cuivre qui avait 2 millimètres d'épaisseur, séparés entre eux par une couche de résine. Un de ces disques était formé de 212 morceaux, pesant chacun 230 à 250 milligrammes, et l'autre était formé de 433 morceaux, qui pesaient chacun à peu près la moitié de ceux du premier disque : les forces développées par l'aimant tournant et mesurées par la torsion ont été, dans le rapport de 1 : $\frac{1}{4}$, tandis que le nombre des morceaux n'a augmenté que de 1 : 2.

Passons à des disques formés de lames de cuivre très-minces, suspendus à un fil simple de cocon. Je construis

un disque avec six lames très-minces, pesant en tout 625 milligrammes et ayant 21 millimètres de diamètre. Les six disques sont isolés entre eux par une couche de résine, et le poids du disque composé est de $1^{gr},120$. Je mesure l'effet de l'électro-aimant tournant d'abord sur ce disque coupé en huit secteurs, et ensuite sur un disque de la même épaisseur et du même diamètre, formé de 380 à 400 morceaux obtenus en coupant les mêmes lames de cuivre, et qu'on isole entre eux en les mêlant avec de la résine. Les deux disques étant à la même distance de 8 millimètres des pôles, la force tangentielle mesurée par la durée des révolutions était, pour le disque divisé en un plus grand nombre de parties, $\frac{1}{12}$ de celle du disque divisé en quarante-huit secteurs égaux. On voit déjà, dans ces deux expériences, que l'effet de la division est moins grand que celui obtenu lorsque cette division est encore très-limitée.

En continuant à couper ces 400 morceaux jusqu'au nombre de 2000 à peu près, et en composant avec ces morceaux ainsi réduits un disque semblable au précédent, la force développée par l'aimant tournant à la distance de 4 millimètres des pôles, dans le disque de cuivre le plus divisé, était de $\frac{1}{3}$ de celle de l'autre disque. J'ai eu soin, après avoir dissous avec de l'alcool la résine qui réunit les 400 morceaux, et après les avoir réduits à 2000 à peu près, de les tenir pendant un certain temps dans l'acide chlorhydrique étendu. J'ai dû, dans cette dernière expérience, diminuer la distance des disques des pôles pour obtenir des effets plus marqués.

Je vous décrirai en dernier lieu le résultat obtenu avec deux disques suspendus à la hauteur de 7 millimètres des pôles, de dimensions égales et formés de 625 milligrammes de cuivre et de résine : un de ces disques était composé de

400 morceaux, et l'autre de poudre très-fine obtenue par le procédé déjà décrit. La force développée dans ce second disque, qui contenait quelques millions de particules de cuivre isolées entre elles, était $\frac{1}{22}$ de la force du premier disque.

Il est donc démontré que, dans les mélanges de fragments métalliques et de résine, la division exerce une influence d'autant moindre pour diminuer la force développée par l'aimant tournant, que cette division est plus grande. On pourrait donc s'attendre à trouver que cette force serait restée constante, et même serait devenue plus grande dans un mélange formé de résine et de poudre métallique très-divisée, que celle d'un autre mélange contenant la même proportion de résine et une poudre métallique moins divisée. L'expérience a pleinement confirmé cette prévision. J'ai déjà dit comment, avec un procédé semblable au bocardage, j'obtenais du cuivre précipité sur l'électrode négative, des poudres plus ou moins fines. J'ai préparé avec ces différentes poudres des disques de 20 millimètres de diamètre, qui pesaient 1^{gr},120, et contenaient 625 milligrammes de poudre métallique uniformément mêlée avec de la colophane. Ces disques, qu'il faut préparer avec soin pour être sûr de l'homogénéité des mélanges et du diamagnétisme de la résine et de la poudre métallique dont ils sont formés, étaient suspendus sous l'électro-aimant tournant (*fig.* 12) à un fil simple de cocon, à la hauteur de 4 millimètres sur les pôles. Malgré la grande différence qui existait entre le degré de division des poudres métalliques qui entraient dans ces disques, j'ai trouvé que les effets développés par l'aimant tournant n'ont été que très-peu différents entre ces disques, et qu'il y avait un état de division intermédiaire qui donnait lieu constamment à des effets un peu plus grands que ceux

obtenus par des poudres un peu plus ou un peu moins fines. On devait aussi s'attendre à trouver que la poudre de cuivre dans l'état de la plus grande division aurait été moins active, à cause de la transformation d'une partie du métal en oxyde au moment où cette poudre est mêlée à la résine fondue. Cette supposition est, en effet, appuyée par les effets obtenus sur les disques ou les sphères formés avec la poudre de bismuth. J'ai déjà dit que cette poudre est obtenue par le procédé de bocardage pratiqué sur le bismuth broyé dans un mortier de marbre, et tamisé avec une toile de batiste très-fine. J'ai comparé ces disques de poudre de bismuth à ceux formés avec la poudre de cuivre, en me mettant dans les mêmes circonstances pour les poids, le diamètre et la composition, et pour leur distance des pôles. Les effets développés par l'aimant tournant ont été trouvés constamment un peu plus grands sur les disques de poudre de cuivre que sur ceux de poudre de bismuth, et, dans ces derniers, la poudre plus divisée a été plus active que celle qui était moins divisée.

Ainsi donc, lorsqu'on a une masse métallique déjà divisée en un grand nombre de particules séparées entre elles par une matière isolante, et uniformément distribuées dans le mélange, la force développée dans cette masse par l'aimant tournant est à peine diminuée et cesse bientôt de l'être, par un degré ultérieur de division. Si l'on continue à pousser la division aussi loin que l'on peut avec les moyens mécaniques et physiques, cette force, au lieu de rester stationnaire, éprouve une augmentation; cette augmentation se manifeste sur des mélanges de résine et de particules métalliques d'autant moins petites qu'elles appartiennent à un métal moins conducteur de l'électricité.

Quel est donc l'effet de la division? Faut-il imaginer que l'état de division et l'enveloppe isolante des particules métalliques mettent en évidence une force qui était neutralisée par l'agrégation et par l'état solide de la matière?

Recourons encore à l'expérience. Nous savons ce qui arrive si un petit disque ou un globule de cuivre est suspendu à un fil de cocon en face du pôle d'un électro-aimant terminé par une extrémité conique. En fermant le circuit, le globule est brusquement repoussé et retombe immédiatement dans la verticale, et, si l'on ouvre alors le circuit, le globule est brusquement attiré vers le pôle. Substituons à ce globule de cuivre un petit flocon de poudre de cuivre qui conserve souvent un tant soit peu d'agrégation après avoir été chauffée au milieu du gaz hydrogène, ou bien un disque de papier mince sur lequel on a étendu un peu d'eau gommée, et ensuite répandu de la poudre de cuivre. En fermant le circuit de l'électro-aimant, le flocon ou le disque est repoussé du pôle; mais, cette fois, *il reste dévié de la verticale* et éloigné du pôle, après avoir fait un nombre d'oscillations qu'on voit diminuer à mesure qu'on emploie de la poudre moins fine ou que l'on comprime davantage celle qui compose le flocon.

La propriété que l'état d'agrégation neutralise dans le cuivre soumis à l'aimant est donc celle de la répulsion diamagnétique.

Faut-il maintenant s'empresser de considérer la propriété du magnétisme par rotation des mélanges de poudres de cuivre et de résine, comme dues à des forces électromotrices induites dans les particules métalliques, et rendues plus grandes par leur action réciproque et à

cause de leur isolement? Attribuant la cause du diamagnétisme à l'induction moléculaire, ne pourrait-on pas concevoir que certains corps diamagnétiques n'acquièrent pas, comme le phosphore, le soufre, etc., la propriété du magnétisme par rotation, à cause d'une espèce de *pouvoir coercitif* trop fort?

C'est à la fin de ce cours, et après avoir étudié l'action générale du magnétisme et la relation qui existe entre la force moléculaire et la force magnétique, que vous pourrez concevoir la possibilité de résoudre ces questions en s'appuyant sur une hypothèse qui nous paraît résulter de l'ensemble des faits qui forment le sujet de ce cours, et dont la vérité nous paraît devenir chaque jour plus manifeste.

CINQUIÈME LEÇON.

Action universelle du magnétisme. — Phénomènes diamagnétiques. — Polarités magnétique et diamagnétique.

Nous nous sommes longuement étendu sur les courants induits développés dans une masse métallique qui tourne en présence d'un aimant ou qui est soumise à un aimant en rotation ; nous avons vu comment les courants induits, qui n'ont qu'une durée très-courte, peuvent produire des mouvements qui s'accélèrent avec le temps, toutes les fois que la rotation renouvelle les points sur lesquels l'induction s'exerce. Nous avons insisté dans la dernière leçon sur des expériences qui prouvent que les effets du magnétisme par rotation peuvent se développer dans des masses absolument privées de matière magnétique et formées d'un mélange homogène de particules métalliques très-fines et de colophane ou de quelque autre matière isolante. Passons maintenant à l'étude de l'action de l'aimant sur tous les corps. Il n'y a pas longtemps que les physiciens admettaient seulement dans le fer et dans quelques-uns de ses composés la propriété d'être attirés par l'aimant. C'est Coulomb qui en 1812 a annoncé le premier que de très-

petites aiguilles d'or, d'argent, de cuivre, etc., oscillaie un peu plus rapidement entre les pôles d'un aimant qu lorsqu'elles étaient soustraites à l'influence magnétique.

Ce résultat, qu'on ne saurait expliquer aujourd'hui sans imaginer que les métaux employés par Coulomb sous la forme d'aiguilles, qui n'avaient que $\frac{1}{4}$ de millimètre d'épaisseur, contenaient une certaine quantité de fer, conduisait ce célèbre expérimentateur à chercher sur des mélanges formés de proportions différentes de cire et de limaille de fer, quelle était la quantité de ce métal qui aurait suffi à expliquer les effets trouvés dans les métaux considérés comme non magnétiques. C'est d'après ces recherches que Coulomb resta dans le doute si l'action magnétique très-faible qu'il avait découverte était due à une quantité de fer, très-petite et insaisissable à l'analyse chimique, contenue dans les corps supposés inactifs, ou a une action de l'aimant plus générale qu'on ne le croyait alors.

Les grandes découvertes de Oersted et d'Ampère étaient à peine achevées, lorsque Arago trouva que tous les métaux agissent sur le fer doux, pendant qu'ils transmettent un courant électrique. M. Becquerel, père, avait aussi observé que des corps très-faiblement magnétiques et qui ont une forme oblongue, prennent sous l'action d'un courant électrique une direction différente de celle d'une aiguille de fer.

D'un autre côté on savait par une observation très-ancienne de Brugmanns, vérifiée plus tard par Lebaillif, de Haldat, Seebeck, MM. Becquerel, Saigey, Hansteen, etc., que le bismuth et l'antimoine sont repoussés par l'aimant.

Mais c'est encore à Faraday que nous devons la véri-

table découverte de l'action répulsive de l'aimant sur un grand nombre de corps appelés par lui *diamagnétiques*, et celle de la propriété qu'ont ces corps, lorsqu'ils ont une forme oblongue, de se diriger perpendiculairement à la ligne polaire.

Depuis cette découverte de Faraday, qui fut connue dans le mois de novembre 1845, la science s'est enrichie d'une foule de faits importants, et des rapprochements nouveaux se sont établis entre le magnétisme et les autres branches de la physique. Néanmoins, ce grand progrès, qui a ébranlé des théories célèbres, n'a pas encore amené la découverte d'une loi ou d'un principe général; de là vient la difficulté que j'éprouve à vous exposer, dans une seule leçon, avec l'ordre et la critique indispensables dans un cours, les connaissances nombreuses et très-variées que nous possédons aujourd'hui sur l'*action universelle du magnétisme.*

C'est généralement avec des électro-aimants très-forts qu'il faut opérer pour découvrir les propriétés magnétiques des corps privés de fer. A cet effet, on a un électro-aimant (*fig.* 14) en fer à cheval, qui porte des pièces prismatiques en fer doux, fixées sur les surfaces polaires (*fig.* 19 et 26). En rapprochant plus ou moins les extrémités de ces prismes, terminées, ou en demi-sphères, ou en pointes, ou en surfaces planes et très-étendues, on réussit à faire varier l'intensité et la distribution des forces magnétiques entre les deux pôles. Pour essayer quels sont les propriétés et les mouvements développés dans un corps par l'action magnétique, on le suspend à un fil de cocon, très-près d'une des extrémités polaires, ou plutôt dans l'angle qui est formé par la réunion de ces extrémités, quand elles ont la forme sphérique ou conique

et qu'elles sont mises en contact. On peut rendre les mouvements excités par l'aimant encore plus faciles, en fixant le corps à l'extrémité d'une tige très-mince de paille ou d'ivoire, suspendue horizontalement à un fil de cocon. On peut enfin donner au corps la forme d'un cylindre ou d'une aiguille, et le suspendre ainsi par son milieu au fil de cocon, de manière qu'il puisse tourner librement dans un plan horizontal qui passe par les pôles de l'électro-aimant.

Lorsqu'on ferme le circuit et que l'électro-aimant entre en activité, le corps sera ou attiré ou repoussé, et, s'il est en forme d'aiguille, il sera dirigé dans la ligne polaire, ou repoussé normalement à cette ligne. Si l'on veut mesurer la force qui sollicite le corps à se porter vers le pôle, ou à s'en éloigner, on le suspend à un fil d'argent très-fin, et on détermine cette force par la torsion nécessaire à ramener le corps dans la position qu'il occupait avant l'action magnétique. On mesure aussi la force développée par l'aimant à l'aide d'une balance très-délicate; à cet effet, on suspend le corps très-près d'un pôle à un des plateaux, et on mesure le poids qu'il faut pour rétablir l'équilibre troublé par l'action magnétique. Il y a des cas dans lesquels on donne au corps la forme d'un cylindre qu'on fait osciller entre les pôles de l'électro-aimant.

On conçoit qu'il est nécessaire, dans l'emploi de ces différents procédés, d'opérer sur des corps aussi purs que possible, d'avoir constantes les distances, la forme et les dimensions des corps qu'on veut comparer, ainsi que les forces électromagnétiques. Comme on est obligé d'employer des forces très-grandes et qui agissent à des distances très-petites, les moindres différences suffisent pour que les résultats ne puissent plus se comparer entre eux.

Soumettons maintenant, l'un après l'autre, un grand nombre de corps à l'action de l'électro-aimant, et pour cela réduisons ces corps en fragments qui aient la forme de petits globules ou de cubes aussi réguliers que possible, et suspendons-les à un fil simple de cocon à l'aide d'un nœud ou d'une très-petite goutte d'eau gommée. Ce petit pendule est porté à une très-petite distance du pôle ou de l'angle des deux pôles réunis. Quel que soit le corps solide sur lequel on fait agir l'électro-aimant, on n'a pas réussi jusqu'ici à en trouver un seul qui fût indifférent à cette action : nous avons déjà dit qu'il y a un certain nombre de corps qui sont attirés vers l'aimant et un plus grand nombre qui en sont repoussés, et nous ajouterons maintenant que ces effets ont lieu également en employant l'une ou l'autre des extrémités polaires de l'électro-aimant ou toutes les deux à la fois très-rapprochées entre elles. Commençons par signaler le fer qui est attiré par l'aimant avec une force très-grande, et qu'on ne peut comparer à celle qui agit sur tous les autres magnétiques et surtout avec la force que l'aimant exerce en sens contraire sur les corps diamagnétiques. Le nickel, le cobalt, le manganèse, le chrome, le platine, le titane, le cérium, le palladium, l'osmium viennent après le fer dans l'échelle des métaux magnétiques; nous ne connaissons pas de corps, si on excepte l'oxygène, qui soit attiré par l'aimant, s'il ne contient pas les métaux que nous avons nommés ou leurs composés. La liste des corps diamagnétiques est très-nombreuse; l'arsenic, l'antimoine et surtout le bismuth occupent le premier rang. En réduisant à l'état de poudre très-fine le cuivre et l'argent et en détruisant ainsi leur conductibilité, on voit ces métaux, comme je vous l'ai déjà montré dans la leçon précédente, repoussés par l'aimant.

A côté du bismuth et de l'antimoine viennent le phosphore, le phosphore rouge de Schrötter, le selénium, le diamant, le souffre et tous les corps d'origine organique pris à l'état de cristallisation afin d'être sûr de leur pureté; je me borne ici à en signaler un certain nombre dans lesquels j'ai trouvé le pouvoir diamagnétique très-distinct, tels que l'acide stéarique, le sucre, la naphtaline, la strichnine, l'urée, l'asparagine, la salicine, la cafféine, l'indigotine, la créatine, le camphre, l'acide cacodilique, la cire purifiée, etc.

Il est facile de reconnaître sur un grand nombre de corps liquides des propriétés semblables. A cet effet, on remplit de liquide une petite boule de verre aussi mince que possible, ou un tube de plume d'oie. Parmi les liquides magnétiques, il faut nommer toutes les solutions ferrugineuses; les liquides diamagnétiques sont : le sulfure de carbone, les huiles fixes et les essences, le mercure, l'eau, l'alcool, etc. L'action de l'aimant s'exerce aussi sur les gaz et particulièrement sur l'oxygène, dont la propriété magnétique est bien distincte. Nous examinerons plus tard les effets de l'aimant sur les corps liquides et gazeux, dans lesquels ces effets donnent lieu à des pressions et à des changements de forme à cause de leur état moléculaire. Ces remarques suffisent pour le moment à nous faire comprendre que dans les mouvements excités dans un corps solide par l'aimant, on ne peut considérer comme nulle l'influence du milieu liquide ou gazeux qui l'entoure.

Étudions maintenant avec plus de soin les lois de ces mouvements, et imaginons, pour plus de simplicité, que le fragment du corps suspendu au fil de cocon et soumis à l'aimant soit amorphe et réduit en forme de cube ou de

sphère. Au moment où l'action magnétique commence, ce corps, suivant sa nature, s'approche ou s'éloigne de l'extrémité polaire, et, après un certain nombre d'oscillations plus ou moins rapides, s'arrête à une certaine distance de la verticale. Pour concevoir ces phénomènes, on pourrait imaginer que la force de l'aimant modifie l'*état* magnétique de ce corps et que ses mouvements sont excités par l'action réciproque qui se développe entre la force de l'aimant et une force de même nature qui serait induite dans le corps dans une certaine direction. Il se présente ici une grande différence entre les corps magnétiques et le fer principalement et les corps diamagnétiques. Nous disons que le fragment de fer est magnétisé par induction et qu'il acquiert des pôles magnétiques en vertu desquels il agit sur des fragments semblables, comme le ferait un aimant. Dans les corps diamagnétiques cette polarité n'existe pas ou elle est excessivement faible, et l'expérience n'a pas encore démontré qu'un corps diamagnétique, en présence de l'aimant, exerce une action quelconque sur d'autres corps semblables.

Ces principes posés, tâchons de découvrir quelle est la distribution des forces qui émanent de l'aimant, et qui agissent sur les corps magnétiques et sur les diamagnétiques. A cet effet, commençons par faire agir l'aimant sur de la poudre très-fine de fer ou de bismuth, uniformément répandue sur une feuille de papier. Considérons d'abord l'action d'une seule extrémité polaire réduite en forme de pointe, placée verticalement afin de concentrer autant que possible la force magnétique dans l'axe de cette pointe. Les particules de fer se rassemblent sur le pôle et se réunissent en lignes qui, à une extrémité, adhèrent ensemble et se resserrent au-

tour de la pointe polaire et, de l'autre, forment une espèce de houppe dont les filets divergent en s'éloignant de l'aimant. Avec la poudre de bismuth, on voit se former sur le papier un disque dont le centre est la pointe de la pièce polaire d'où les particules métalliques sont repoussées. Pour faciliter la formation de ces lignes, il faut donner de petits coups sur le papier, ce qui, en soulevant la poudre métallique de la feuille, rend plus libres les mouvements des petits fragments. Entre les extrémités polaires opposées ces phénomènes sont plus compliqués. On sait que si on emploie de la limaille de fer très-fine, on obtient les *lignes* ou *courbes magnétiques* qu'on peut fixer et conserver en appliquant sur le papier où elles se sont produites une autre feuille imbibée d'une solution concentrée de gomme. Ces lignes sont formées par des séries de grains de fer, transformés en aimants qui adhèrent entre eux dans la direction de leurs pôles. On pourrait également tracer ces lignes en parcourant tous les points du champ magnétique avec une très-petite aiguille aimantée suspendue de manière à ne pouvoir tourner que dans le plan de son axe magnétique; en faisant mouvoir l'aiguille dans le sens de sa longueur, on trouverait dans tous les points la direction de son axe tangente à une courbe magnétique.

Lorsqu'on fait l'expérience sur la poudre de bismuth en employant les deux pôles terminés en pointe et placés à une petite distance entre eux, on n'aperçoit pas de différence dans la forme des deux disques ainsi formés. Si l'on change la forme des extrémités polaires ou leur distance, si, au lieu des pôles de nom contraire, on met en présence des pôles de même nom, si entre ces pôles on place des barreaux aimantés ou des morceaux de fer doux

qui deviennent bientôt des aimants, la forme des courbes magnétiques change immédiatement, car ces courbes, comme nous venons de le dire, tracent toujours géométriquement les points du champ magnétique où sont appliquées les résultantes des forces polaires suivant lesquelles les particules de fer se dirigent.

Imaginons maintenant un fragment magnétique ou diamagnétique suspendu entre les deux pôles et libre de se mouvoir dans tous les sens; la direction dans laquelle ce fragment sera sollicité à s'approcher ou à s'éloigner des pôles n'est pas donnée par celle des courbes magnétiques. Faraday, depuis ses premières expériences sur le diamagnétisme, avait très-bien observé qu'un fragment de bismuth peut tantôt se mouvoir suivant ces courbes et tantôt les traverser, mais que l'essentiel dans ces mouvements est que ce fragment se transporte dans les points où l'action magnétique est plus faible. M. Thompson qui a déduit de l'analyse la démonstration de cette vérité, a donné aussi quelques exemples de mouvements de petites boules de fer convenablement suspendues entre les pôles, qui prouvent qu'un corps, suivant qu'il est magnétique ou diamagnétique, est toujours sollicité en présence de l'aimant, à s'approcher ou à s'éloigner des extrémités polaires, dans une direction qui est celle dans laquelle la force magnétique s'accroît ou diminue plus rapidement. On pourrait aussi imaginer de donner aux extrémités polaires des formes telles que, suivant ces mêmes principes, les corps diamagnétiques s'approcheraient de ces extrémités comme s'ils en étaient attirés, et les corps magnétiques se conduiraient comme s'ils en étaient repoussés.

Parmi les exemples de cette influence de la forme des

extrémités polaires, je remarquerai ce qui arrive avec un pôle percé dans son axe : une aiguille de bismuth est repoussée vers le centre du trou et paraît attirée tandis qu'une aiguille de fer éprouve des mouvements contraires.

Je puis vous montrer avec un procédé très-simple la loi de ces mouvements. Je dispose entre les pôles de l'électro-aimant (*fig.* 19) une boîte carrée de cristal *acfd* dans laquelle je verse un liquide formé d'un mélange de 140 parties d'alcool concentré et de 20 parties d'une solution saturée de chlorure de fer ; ce mélange a à peu près la densité de l'huile d'olive. La solution ferrugineuse est magnétique, et l'huile est diamagnétique. Je commence par distribuer dans les différents points de la première masse liquide de petites gouttes d'huile de 2 à 3 millimètres de diamètre qui y restent suspendues. Aussitôt qu'on ferme le circuit, les gouttes d'huile se mettent en mouvement, s'éloignent des surfaces polaires et se précipitent sur la ligne équatoriale suivant des courbes plus ou moins inclinées à mesure qu'on s'approche des bords des pôles. Si je renverse la disposition de ces deux liquides, on verra les gouttes ferrugineuses suspendues au milieu de l'huile suivre les mêmes lignes en s'approchant des surfaces polaires. Il est rare qu'on parvienne à voir des gouttes magnétiques ou diamagnétiques s'arrêter au centre du champ magnétique ; en plaçant d'avance un certain nombre de ces gouttes dans la ligne équatoriale on les verra dans un cas se précipiter vers le centre des surfaces polaires et dans l'autre s'en éloigner suivant les mêmes lignes, et tendre à se séparer entre elles. Pour déterminer exactement la direction de ces mouvements, on n'a qu'à coller sur le fond de la boîte un papier divisé en petits carrés égaux sur lesquels on rapporte la position successive de

ces gouttes. Si l'on mêle les deux liquides en quantités à peu près égales, de manière à ce qu'il y ait des gouttes d'huile dans tous les points de la masse, on verra (*fig.* 19), lorsque l'action magnétique commence, ces liquides se séparer en deux régions; le liquide ferrugineux se rassemble en contact des surfaces polaires sous la forme de deux demi-sphères entre lesquelles se logent les gouttes d'huile; à mesure que les pôles sont plus rapprochés, ces demi-sphères s'approchent aussi, et ce n'est que quand ils sont à une très-petite distance qu'on voit le liquide ferrugineux former une couche continue au milieu. Les formes des surfaces de séparation des deux liquides sont si régulières et si constantes, que la moindre variation dans la force d'un des pôles ou dans la distribution de la masse liquide est tout de suite manifestée par une dissymétrie dans ces figures. Je vous ferai voir encore ce qui arrive lorsque la masse des deux liquides mêlés est en contact avec l'angle formé par les deux extrémités polaires réunies : dans ce cas, les deux liquides sont séparés par une surface courbe plus ou moins concave en dehors, et qui a son sommet dans la ligne polaire, si tout est symétrique autour de cette ligne.

A ces mouvements d'attraction ou de répulsion des différents corps soumis à l'aimant correspondent les deux positions qu'ils prennent entre les pôles, lorsqu'ils ont une forme oblongue et qu'ils sont suspendus horizontalement par leur centre de gravité. Imaginons d'avoir des surfaces polaires carrées et étendues, de manière que les forces magnétiques soient distribuées uniformément entre les pôles; si la matière de l'aiguille suspendue dans ce champ est capable de polarité, de manière que par l'action mutuelle de ses parties les forces qui en éma-

nent n'aient pas la même intensité dans tous les points, comme il arrive avec le fer, l'aiguille se placera avec son axe tangent aux courbes magnétiques et sera dirigée avec une grande force dans la ligne polaire. Le même mouvement aurait lieu, mais avec une force moins grande, si l'aiguille était d'une matière attirée par l'aimant, sans être susceptible de polarité qu'à un degré très-faible, car les différentes parties de cette aiguille ne seront en équilibre qu'après s'être placées à la plus petite distance possible des pôles. On conçoit également qu'avec des aiguilles formées de corps diamagnétiques dont la polarité paraît nulle, la position d'équilibre entre les pôles résulte de l'action que nous avons déjà étudiée, par laquelle ces aiguilles sont sollicitées à se transporter dans les points où l'action magnétique est la plus faible. On dit que les corps diamagnétiques prennent la direction *équatoriale* et les corps magnétiques la direction *axiale*.

En ayant une grosse goutte d'huile *a* (*fig.* 20) suspendue au milieu du liquide ferrugineux entre les pôles de l'électro-aimant ou une goutte du liquide ferrugineux au milieu de l'huile, on voit la goutte diamagnétique s'allonger dans la ligne équatoriale et presque toujours s'enfuir d'un côté ou de l'autre, et dans le second cas subir les mêmes changements suivant la ligne polaire.

Avant d'abandonner l'étude des phénomènes de la direction des corps magnétiques et diamagnétiques entre les pôles, il est important de considérer ce qui arrive dans les premiers lorsqu'ils sont doués d'une faible polarité. Voici d'abord quelques expériences qui nous feront comprendre pourquoi des aiguilles dans lesquelles la polarité magnétique ne peut se propager facilement ou de la même manière dans toute les directions, se placent en équilibre

dans la ligne équatoriale. Je suspends entre les pôles d'un électro-aimant un cylindre de cire de 100 millimètres de longueur et sur lequel sont fixés normalement à sa longueur de petits bouts de fils de fer de 3 ou 4 millimètres et séparés entre eux par une intervalle de 8 à 10 millimètres. Lorsque l'électro-aimant agit, le cylindre se dirige dans la ligne équatoriale; c'est que, dans cette position, chaque petit bout de fil de fer, devenu aimant, se dirige dans la ligne polaire. Si on augmente le nombre de ces petits bouts jusqu'à ce qu'ils se touchent, le cylindre de cire finira par se placer dans la ligne polaire. Un cylindre de cire sur lequel sont fixés de petits disques de fer se comporte de la même manière, suivant que ces petits disques sont placés ou normalement ou parallèlement à l'axe du cylindre. J'en dirai autant d'une spirale de fil de fer dont les spires sont plus ou moins rapprochées entre elles.

On avait imaginé d'expliquer l'équilibre des aiguilles diamagnétiques dans la position équatoriale par une polarité magnétique *transversale*, semblable à celle dont je viens de vous donner plusieurs exemples; mais il ne fallait pas oublier, en essayant de donner cette explication du diamagnétisme, que les moindres globules de bismuth ou de tout autre corps diamagnétique, sont repoussés par l'aimant.

Il est temps d'arriver aux lois fondamentales des actions magnétiques et diamagnétiques. Comment ces actions varient-elles avec les intensités des forces inductrices, avec la masse des corps induits, et avec les distances?

On comprendra facilement toutes les difficultés associées à la recherche de ces lois, si l'on pense qu'on est obligé de recourir à des forces magnétiques très-puissantes, de placer les corps induits à des distances très-

petites des extrémités de l'aimant, et de tenir compte de l'influence du milieu et de l'état d'agrégation et de cristallisation de ces corps.

Lorsque Coulomb étudiait les lois élémentaires des forces magnétiques, il suspendait à un fil de cocon un fil d'acier pesant 70 grains, d'un pouce de longueur, aimanté par la méthode de la double touche; après que cette aiguille s'était arrêtée dans le méridien magnétique, il plaçait verticalement dans ce méridien un fil d'acier également aimanté, de 25 pouces de longueur, de manière que son extrémité fût toujours de 10 lignes au-dessous du niveau de l'aiguille horizontale, c'est-à-dire avec le pôle dans le plan de cette aiguille. Coulomb faisait ensuite osciller cette aiguille à des distances différentes du pôle de l'aimant vertical, comptait le nombre des oscillations faites dans un même nombre de secondes, et mesurait les distances entre le pôle et le centre de l'aiguille. C'est de cette expérience qu'il déduisait la proposition suivante qui a été jusqu'ici le fondement de la théorie du magnétisme : le fluide magnétique agit par attraction ou répulsion, suivant la raison composée directe de la densité du fluide et la raison inverse du carré des distances de ses molécules. La démonstration expérimentale de cette loi, telle que Coulomb l'a donnée, suppose donc la connaissance de la position des pôles et l'invariabilité de l'état magnétique des aimants. Ces deux conditions nous manquent entièrement lorsque nous agissons avec l'électro-aimant sur des corps magnétiques semblables au fer doux et sur les corps diamagnétiques.

Avant de vous décrire les résultats des expériences tentées dans ces dernières conditions, je dois vous rappeler encore les expériences de M. Biot, qui ont déterminé l'ac-

tion exercée entre un aimant et un conducteur voltaïque, et la formule avec laquelle Ampère a exprimé l'action de deux éléments de courants électriques, déduite directement de quelques cas d'équilibre électro-dynamique démontrée par expérience, et dont M. Weber a dernièrement fait connaître une nouvelle vérification expérimentale. Ces actions, quoique exercées entre des corps différents et dans des conditions en apparence si diverses, dépendent néanmoins de la même loi élémentaire qui est aussi celle des fluides magnétiques de Coulomb. En se représentant suivant l'hypothèse d'Ampère, les propriétés des aimants, comme dues au mouvement continuel de neutralisation des deux fluides électriques autour de leurs particules, on est amené à un seul principe, qui est le fondement de toute l'électro-dynamique; c'est que la force électro-dynamique produite par l'action réciproque de deux fils conducteurs qui transmettent des courants d'égale intensité, est proportionnelle au carré de cette intensité, et que les actions électro-dynamiques sont régies à distance par les mêmes lois que les magnétiques.

Supposons maintenant de vouloir étudier l'action diamagnétique dans le but de découvrir si elle dépend de la même loi élémentaire des autres phénomènes électro-magnétiques. Cette recherche, qui se présente d'abord à l'esprit, ne peut se tenter qu'en agissant avec l'électro-aimant, puisqu'un conducteur voltaïque ou des barreaux aimantés n'ont que peu ou point d'action sur le bismuth, Il fallait donc commencer par connaître la relation qui existe entre l'intensité d'un courant électrique et celle de la force magnétique que ce courant développe dans un cylindre de fer doux.

MM. Lenz et Jacobi ont été les premiers à établir sur

des expériences remarquables les deux propositions suivantes qu'on avait considérées jusqu'à ces derniers temps comme généralement vraies :

1° La force magnétique d'un électro-aimant, mesurée par son action sur une aiguille aimantée, est proportionnelle à la force du courant, multiplié par le nombre de tours ou spires de la bobine enveloppante ;

2° L'attraction de deux électro-aimants ou d'un électro-aimant pour un cylindre de fer doux est proportionnelle au produit de leurs forces magnétiques ou à celui des forces magnétiques, inductrice et induite, c'est-à-dire qu'en supposant ces forces produites par des courants d'égale intensité, les actions réciproques sont proportionnelles aux carrés de cette intensité.

On à reconnu après que ces deux propositions ne sont vraies que dans certaines limites, et, à ce propos, je ne puis vous laisser ignorer un résultat qui est d'une grande importance pour la théorie du magnétisme, mis aujourd'hui hors de doute par les expériences de MM. Joule, Dub, Muller, Poggendorff, et tout dernièrement par celles de M. Weber. On a trouvé que la force magnétique communiquée à un barreau de fer doux par un courant électrique n'augmente pas avec l'intensité de ce courant, mais qu'elle tend toujours vers une limite qui est le point de *saturation* de ce barreau. Je ne m'arrêterai pas à vous décrire les nombreuses recherches qui ont été tentées dans des conditions différentes pour démontrer ce résultat et qui ne peuvent, par conséquent, s'accorder complétement entre elles. Lorsqu'on mesure la force magnétique d'un électro-aimant par son action sur une aiguille aimantée, ou sur un petit magnétomètre, il ne faut pas négliger l'influence de la spirale, qui, restant constante, doit produire

des effets comparativement différents suivant l'épaisseur du cylindre de fer doux. On doit aussi trouver des différences suivant qu'on emploie des cylindres de fer, plus ou moins longs que la bobine. Malgré ces différences, il est toutefois hors de doute que l'état magnétique du fer doux, surtout s'il est employé en cylindre d'un petit diamètre, n'augmente pas avec le courant *magnétisant*, et parvient ainsi à un *maximum* que nous avons appelé point de saturation du fer.

Ce résultat devait nécessairement influer sur la seconde loi de MM. Lenz et Jacobi, et c'est en effet ce qu'on a trouvé en tenant le fer à une très-petite distance ou en contact des pôles de l'électro-aimant. On peut voir, même avec des expériences très-grossières dans lesquelles on fait varier la distance entre un électro-aimant et une sphère de fer doux qu'on tient suspendue sur la surface polaire, que l'attraction augmente dans chacune de ces expériences d'autant moins, avec les mêmes accroissements du courant de l'électro-aimant, que ces distances sont plus petites. A cet effet, on suspend une boule de fer par un fil de laiton au plateau d'une balance, de manière à ce que le centre de la boule tombe sur l'axe de l'électro-aimant ; on tient la boule à des distances différentes de la surface polaire, et pendant qu'on fait varier le courant dont l'intensité est mesurée avec le voltamètre ou avec une boussole des tangentes, on rétablit l'équilibre en ajoutant des poids différents dans l'autre plateau de la balance jusqu'à ce que la boule retourne à sa position primitive. Il ne faudrait pas conclure d'une manière générale de ces résultats, que les attractions magnétiques entre l'électro-aimant et le fer doux varient tantôt avec la simple force de l'électro-aimant ou de son courant et tantôt avec le carré

de cette force, suivant que ces attractions s'exercent au contact ou à de petites distances ; on s'exposerait ainsi à admettre l'existence d'attractions plus grandes dans le second cas que dans le premier. Il est certain que ces attractions sont absolument plus grandes à mesure que les distances diminuent, mais justement pour cela le magnétisme induit arrive plus tôt à son point de saturation.

Vous comprenez maintenant pourquoi j'ai dû vous parler de la force magnétique développée dans un électro-aimant avant de vous décrire le résultat trouvé en faisant varier cette force en présence des corps diamagnétiques. M. Ed. Becquerel a tenté le premier cette recherche en mesurant avec la torsion la force répulsive développée dans le bismuth ou dans le soufre par le pôle d'un électro-aimant mis en activité avec des courants plus ou moins intenses. M. Tyndall a fait des recherches semblables à celles de M. Becquerel, en employant le même procédé. J'ai moi-même fait un grand nombre d'expériences, en opérant avec des forces magnétiques très-puissantes : je mesurais les courants par l'eau décomposée dans le voltamètre, et je déterminais en même temps la durée de l'oscillation d'un petit cylindre de bismuth suspendu à un fil de cocon entre les pôles de l'électro-aimant. Ces différentes expériences, que MM. Ed. Becquerel et Tyndall ont étendues au fer pris aussi pur et aussi doux que possible, s'accordent à établir qu'un électro-aimant attire le fer doux et repousse le bismuth avec une force qui varie approximativement en proportion du carré de l'intensité du courant magnétisant.

Ce résultat a été obtenu en opérant avec des électro-aimants très-puissants, c'est-à-dire avec des aimants tem-

poraires formés de cylindres de fer très-épais, dans lesquels la force magnétique continue davantage à augmenter avec celle du courant magnétisant; quand même ce résultat ne serait vrai que dans certaines limites, il est néanmoins d'une grande importance, car il est naturel de l'interpréter en admettant que les corps diamagnétiques n'ont pas de pouvoir coercitif et que le diamagnétisme aussi résulte d'un état d'induction.

C'est en répétant ces mêmes expériences sur des aiguilles d'acier, de fonte, d'oxyde de fer, etc., qu'on trouve bientôt l'influence du pouvoir coercitif, et que la loi précédemment exposée cesse de se vérifier. Ces différents corps, qui n'acquièrent tout le magnétisme dont ils sont susceptibles qu'en prolongeant l'action de l'aimant, qui restent aimantés après que l'action de l'électro-aimant a cessé, et qui acquièrent ainsi des pôles, tantôt *transversalement*, tantôt aux extrémités, doivent nécessairement éprouver des effets qui seront faibles lorsque la force magnétique inductrice est petite, et qui augmenteront rapidement avec cette force. On peut en effet s'assurer, à l'aide d'une aiguille astatique, que la fonte, les oxydes de fer, l'éponge de platine, le charbon ou le coke acquièrent, sous l'action d'un électro-aimant très-fort, des pôles magnétiques qui persistent après que cette action a cessé. Il faut donc attribuer les résultats complexes obtenus sur certaines matières qui n'ont pas de pouvoir coercitif, mêlées à des matières douées de polarité, à la variation que les actions polaires de ces dernières introduisent dans les effets que les premières éprouvent proportionnellement aux carrés des forces inductrices. Ces considérations expliquent suffisamment les phénomènes observés par Oersted sur la direction différente prise par des ai-

guilles de verre, de charbon, et de quelques métaux qui probablement n'étaient pas privés de fer, suivant qu'elles sont suspendues à des hauteurs plus ou moins grandes des extrémités polaires. On pourrait en dire autant de l'observation de M. Plucher sur la propriété tantôt magnétique et tantôt diamagnétique du même morceau d'écorce ou de charbon, suivant qu'il est suspendu ou très-près, ou à une certaine distance de l'aimant, ou suivant qu'on fait varier la force magnétique en tenant le corps à une distance constante. Ajoutons que Faraday a trouvé tout dernièrement que les pouvoirs magnétiques ou diamagnétiques de deux corps ne conservent pas la même valeur relative lorsqu'ils sont essayés à des distances différentes de l'aimant ou soumis à des forces magnétiques variables. En admettant que ces corps soient purs et sans pouvoir coercitif, il nous faudrait, pour comprendre ces résultats, connaître l'influence que le milieu, suivant sa nature, pourrait exercer sur cette loi.

D'après tout ce que nous venons de dire, il serait superflu de vous faire remarquer combien doivent être complexes les résultats trouvés en étudiant la loi des distances sur les corps diamagnétiques. A *priori* et en admettant que dans certaines limites d'intensité des forces magnétiques inductrices les répulsions diamagnétiques varient en raison directe du carré de ces forces, il en réulterait que ces répulsions diminuent en raison de la quatrième puissance de la distance.

Examinons plutôt quelle est l'influence de la quantité de matière magnétique ou diamagnétique sur les forces attractives et répulsives qu'un électro-aimant ou le courant électrique y développe.

On sait depuis longtemps que la force magnétique dé-

veloppée dans un cylindre de fer par un courant transmis dans la spirale qui l'enveloppe, n'est pas diminuée si l'on réduit ce cylindre à un tube de lame de fer d'une petite épaisseur. Il ne faut donc pas chercher cette influence de la quantité de matière magnétique en se mettant dans des conditions dans lesquelles la force inductrice agit à des distances trop inégales sur les différents points de cette matière, et surtout en employant des corps qui se polarisent et dont les parties agissent réciproquement entre elles. En effet, si on fait osciller entre les pôles d'un aimant permanent des aiguilles de fer doux de la même longueur et d'un diamètre différent, on observe que la durée de leur oscillation n'est pas la même. Le moment d'inertie étant proportionnel au poids, si le magnétisme de ces aiguilles était proportionnel aux quantités de matière, ces aiguilles devraient osciller en même temps. Le résultat différent qu'on trouve, et qui consiste dans l'oscillation plus rapide des aiguilles qui sont plus minces, montre donc que le magnétisme élémentaire est d'autant moindre que l'on opère sur des quantités plus grandes de matière magnétique. On est arrivé à la même conséquence en mesurant par des poids les forces d'attraction d'un aimant sur des masses magnétiques placées à une distance constante, et qui sont formées dans un cas d'une pièce continue de fer et dans l'autre de limaille plus ou moins fine mêlée en proportions différentes à de la cire. Les quotients obtenus en divisant les poids qui font équilibre aux forces magnétiques par les unités de poids du fer, sont d'autant plus grands que ces derniers poids sont plus petits.

Il n'en est plus ainsi lorsqu'on agit, comme l'a fait Coulomb, sur des aiguilles formées de particules de fer doux disséminées uniformément et à des distances assez gran-

des entre elles au milieu d'une substance neutre telle que la cire. Dans ce cas, Coulomb a trouvé qu'en faisant avec le même mélange des aiguilles de la même longueur, mais d'un diamètre différent, la durée de l'oscillation était constante pour toutes les aiguilles.

Coulomb a complété la conclusion tirée de cette expérience en opérant sur des aiguilles formées de mélanges en proportions différentes de limaille de fer et de cire, ayant trouvé que les forces exercées par l'aimant sont proportionnelles aux quantités de particules ferrugineuses contenues dans ces mélanges.

M. Ed. Becquerel, mesurant les forces magnétiques par la balance de torsion, et M. Plucher avec la balance ordinaire, ont trouvé, comme Coulomb, que dans des mélanges de cire ou d'un corps gras et de particules très-fines de fer, le magnétisme élémentaire est le même, et que, par conséquent, l'action sur la masse est proportionnelle à la somme de ces particules.

Il est digne de remarque que l'action inductive de molécule à molécule trouble ce résultat dans le sens indiqué par l'expérience. En effet, on sait depuis bien longtemps que l'effort qu'il faut faire pour détacher un cylindre de fer doux du pôle d'un aimant, est beaucoup plus grand que la somme des efforts nécessaires pour vaincre la force du même aimant sur deux cylindres formés en coupant le premier et en les tenant séparément dans les mêmes positions que lorsqu'ils appartenaient au cylindre continu : dans cette expérience, les parties du cylindre plus rapprochées du pôle augmentent l'état magnétique des parties plus éloignés. On pourrait croire que dans les autres manières d'expérimenter, et surtout dans le cas du cylindre massif et du cylindre creux, la partie

centrale du premier, moins aimantée par la plus grande distance des spires ou des courants de la bobine, a son magnétisme neutralisé par l'action inductrice du magnétisme de la couche superficielle : de la même manière, deux prismes de fer, placés à cotés l'un de l'autre comme *ancre* d'un aimant en fer à cheval, s'affaiblissent par leur action réciproque.

Je passe maintenant aux résultats que j'ai obtenu en faisant osciller entre les pôles d'un électro-aimant et dans des circonstances identiques quatre cylindres de bismuth aussi amorphe que possible, qui avaient 30 millimètres de longueur, et dont les poids étaient les suivants : 18gr,600, 4gr,601, 1gr,596, 0gr,576. J'ai trouvé que ces cylindres faisaient *le même nombre d'oscillations dans le même temps.*

Nous verrons dans la prochaine leçon qu'en opérant avec des cylindres trop gros, et surtout s'ils sont coupés sur des masses de bismuth cristallisé, on trouve des différences dans ce résultat ; mais nous verrons aussi qu'elles dépendent de l'état de cristallisation, et qu'elles n'altèrent pas la signification de ce résultat, que j'ai aussi démontré en faisant osciller, entre les surfaces polaires carrées du grand électro-aimant, des cylindres formés avec des plumes d'oie qui avaient la même longueur et un diamètre différent, remplis de bismuth en poudre : j'avais ainsi dans un cas 3gr,360, et dans l'autre 1gr,400 de poudre de bismuth, et la durée de l'oscillation des deux cylindres était exactement la même. Ce résultat n'a pas changé en remplissant les cylindres avec des poudres plus ou moins fines. Ainsi donc les forces développées par l'aimant dans les corps diamagnétiques sont proportionnelles aux masses de ces corps, l'état élémentaire induit

est le même, et il n'existe pas d'action réciproque entre les parties de ces corps soumis à l'aimant.

Jusqu'ici nous avons considéré l'action magnétique s'exerçant sur des corps solides indépendamment du milieu dans lequel ils sont plongés. Mais, puisque nous savons que des corps liquides ou gazeux sont attirés ou repoussés par l'aimant, il faut s'attendre à trouver que les effets de cette action sont modifiés par la nature du milieu.

Voyons d'abord quels sont les phénomènes présentés par une masse liquide ou gazeuse placée entre les pôles d'un fort électro-aimant. Voici une boîte (*fig.* 21) de lames de verre de forme rectangulaire ayant 300 millimètres de longueur et 8 à 10 de largeur. Je dispose cette boîte entre les extrémités polaires le plus rapprochées possible et j'y verse une solution concentrée de chlorure de fer. Au moment où le circuit est fermé, le liquide des deux côtés se transporte sur la ligne polaire où il reste soulevé de plusieurs millimètres en donnant à la surface une courbure qu'on peut déterminer avec exactitude et qui doit représenter la loi du décroissement des forces magnétiques autour de cette ligne. En effet, ces forces sont ici mesurées par les pressions des colonnes liquides qu'elles tiennent soulevées. En substituant au chlorure de fer des liquides diamagnétiques tels que l'eau, le sulfure de carbone, l'acide stéarique fondu, etc., on remarque un effet contraire, c'est-à-dire la dépression de la surface liquide autour de la ligne polaire : comme les pouvoirs diamagnétiques sont comparativement beaucoup plus faibles, il faut employer des couches très-minces de ces liquides, et, malgré cela, les effets qu'on obtient sont bien moins marqués que ceux du liquide magnétique.

Pour rendre ces mouvements encore plus distincts, il

faut approcher des pôles une colonne de ces liquides contenue dans un tube de verre d'un petit diamètre et placé horizontalement : les liquides magnétiques sont vivement attirés et les autres repoussés.

Les masses gazeuses présentent des phénomènes analogues. Ainsi, vous voyez la flamme d'une bougie placée entre les extrémités polaires coniques ou hémisphériques, comme M. Bancalari l'a fait pour la première fois, se séparer en deux parties et fuir la ligne polaire au moment où le circuit de l'électro-aimant est fermé. Tous les gaz, surtout s'ils sont chauffés et rendus visibles au milieu de l'air à l'aide de quelque vapeur blanche, se comportent comme la flamme qui est aussi un gaz incandescent ; les vapeurs d'iode, de brome, d'eau, etc., paraissent également repoussées ou diamagnétiques : l'oxygène seul est vivement attiré dans la ligne polaire. M. Ed. Becquerel a mis hors de doute cette propriété remarquable de l'oxygène en faisant voir qu'un cylindre de charbon devient magnétique après avoir absorbé ce gaz.

En voyant ainsi la force magnétique agir sur les liquides et sur les gaz et y engendrer des pressions, on pouvait croire que cette même force aurait suffi pour produire des variations sensibles dans la densité et la composition chimique de ces fluides. Je m'empresse de vous dire que des expériences très-délicates, faites dans ce but, n'ont pas résolu le doute affirmativement. A cet effet, j'ai opéré sur le chlorure de fer, ou sur une solution d'acétate de plomb ; j'ai soumis ces liquides à l'action de l'électro-aimant pendant qu'ils étaient décomposés par un courant très-faible dont les électrodes consistaient en deux lames de platine très-étendues placées normalement à la ligne polaire. On sait par les expériences de Nobili qu'avec un faible cou-

rant électrique on obtient sur les électrodes plongés dans ces solutions des dépôts très-minces et transparents qui ont les couleurs les plus brillantes. Si autour de la ligne polaire, c'est-à-dire dans des points où la force magnétique est énormément plus grande qu'elle ne l'est à la distance de 15 à 20 centimètres, la densité du liquide ou sa composition auraient été modifiées par cette force, la couleur de la lame mince déposée sur l'électrode ne pourrait plus être uniforme. Au contraire, malgré toutes les précautions prises pour rendre cette expérience plus délicate, la couleur qui apparaît sur l'électrode ne m'a jamais présenté la moindre différence. Ainsi donc la force magnétique non-seulement n'agit pas sensiblement sur la densité et la composition d'un liquide, mais elle est tout à fait impuissante sur les filets électriques considérés indépendamment de la matière pondérable.

L'action de l'aimant est également nulle pour altérer sensiblement la force élastique ou la densité des gaz. M. Faraday s'en est assuré avec un appareil qui aurait pu manifester la variation de $\frac{1}{400000}$ du volume du gaz soumis à l'aimant: l'expérience était faite avec une espèce de thermomètre à air dont la boule était formée d'une lame très-épaisse de fer, remplie d'oxygène ou d'un autre gaz, et portant un index dans son tube.

En ayant égard à l'intensité certainement très-faible des états magnétiques développés sous l'influence de l'aimant dans les molécules des corps liquides ou gazeux, on pourrait jusqu'à un certain point concevoir comment les actions qui peuvent résulter entre les molécules de ces corps doivent être impuissantes à produire des variations sensibles dans la densité et dans la composition chimique. Remarquons encore que les mouvements des masses liquides

ou gazeuses soumises à l'aimant, par lesquels nous jugeons du pouvoir magnétique ou diamagnétique de ces masses, se produisent généralement lorsqu'elles sont entourées d'un milieu qui est aussi sujet à l'action magnétique. Il arrive alors, comme nous le verrons tout à l'heure, que ces mouvements sont en quelque sorte comparables à ceux d'une goutte plongée dans un liquide plus ou moins dense que cette goutte ; certainement les forces nécessaires pour produire ces mouvements seraient tout à fait incapables de déterminer la moindre variation dans les distances relatives des molécules.

On doit être bien plus frappé en voyant que le fer soumis à des forces magnétiques très-puissantes n'éprouve dans son volume aucune variation sensible qu'on puisse attribuer à son état d'aimantation. Il y a déjà longtemps que Gay-Lussac s'est assuré de cela par une expérience répétée ensuite par MM. Wertheim et Joule et par Faraday, et qui consiste à placer entre les pôles d'un électro-aimant une espèce de thermoscope dont la boule contient de la limaille ou des morceaux de fer.

Dans la prochaine leçon, nous verrons quelles sont les variations dans l'état d'équilibre moléculaire qui ont lieu dans le fer ou dans l'acier lorsqu'ils sont aimantés.

Nous devons étudier maintenant de quelle manière les mouvements excités dans les corps par l'aimant sont modifiés par l'action que celui-ci exerce sur le milieu. A ce sujet, il importe de vous faire remarquer que si nous suspendons entre les pôles d'un électro-aimant et dans le vide du baromètre une petite aiguille d'une matière magnétique ou de bismuth, nous la verrons se comporter exactement de la même manière que si l'espace était rempli d'air atmosphérique ou d'un autre gaz. Ce résultat qui est un peu

modifié, comme je vous le montrerai bientôt, en employant du gaz oxygène qui est fortement magnétique, au lieu d'opérer dans le vide ou dans l'air atmosphérique, nous prouve que l'attraction de l'aimant sur les substances magnétiques et la répulsion sur les substances diamagnétiques sont des effets indépendants de la nature et de l'action du milieu, mais qu'il faut tenir compte des pressions que l'aimant développe dans ce milieu.

Supposons qu'on place en contact du pôle d'un aimant une masse fluide formée d'une substance qui serait attirée ou repoussée de ce pôle, quand elle serait dans le vide. L'attraction ou la répulsion du pôle sur les différentes couches de ce fluide, qui diminue rapidement avec les distances, est la cause du soulèvement ou de la dépression de ce fluide en contact du pôle ; il se développe ainsi dans un point quelconque de la masse fluide une pression, outre celle due à la pesanteur, qui varie avec son pouvoir magnétique ou diamagnétique et avec la force de l'aimant sur ce point.

Il suffit de nous rappeler le principe d'Archimède de l'équilibre des corps flottants pour comprendre cette influence des milieux découverte par Faraday et que M. Ed. Becquerel a établie sur des expériences exactes et variées. Voyons d'abord quelques unes des expériences qui prouvent les effets de cette influence. Voici un tube de verre contenant une solution ferrugineuse ; je le suspends entre les pôles d'un électro-aimant ; au moment où le circuit est fermé, nous voyons le tube attiré, et, après quelques oscillations, se fixer dans la ligne polaire. Je fais plonger ce tube dans l'alcool ou dans l'eau, et, en mettant l'aimant en activité, le tube se porte comme auparavant dans la ligne polaire, mais avec une force plus grande à cause de l'ac-

tion des liquides diamagnétiques. C'est là ce que M. Ed. Becquerel a démontré en employant un fil de torsion pour suspendre le tube et en mesurant de combien de degrés il faut tordre le micromètre pour ramener le tube dans ces différentes expériences à la position qu'il occupait avant l'action de l'aimant. Si le liquide dans lequel le tube est plongé est aussi une solution ferrugineuse, il est évident que les effets dépendront du pouvoir magnétique relatif de ce liquide et de celui du tube. En effet, nous verrons qu'il n'y a plus de mouvement dans le tube si ces deux liquides sont de la même nature, en supposant l'action de l'électro-aimant très-faible ou nulle sur la substance du tube. Substituons enfin au liquide dans lequel le tube est plongé une solution ferrugineuse plus concentrée et plus fortement attirée par l'aimant que la solution du tube, et vous comprenez déjà ce qui doit arriver, c'est-à-dire que le tube sera repoussé de la ligne polaire et qu'il ira se fixer dans la ligne équatoriale, comme s'il était formé d'un corps dia magnétique. M. Ed. Becquerel, qui dans ses recherches a varié la matière des aiguilles soumises à l'aimant et la qualité des solutions dans lesquelles les aiguilles sont plongées, est parvenu à démontrer la généralité du principe de *l'action différentielle*, et a fait voir, suivant ce principe, que le *magnétisme spécifique* ou des mêmes volumes des différentes solutions, déduit en employant des aiguilles de nature différente, était approximativement le même. Ainsi donc, nous admettrons que l'action du pôle d'un aimant est égale à la différence des actions exercées sur ce corps et sur le milieu ambiant déplacé, en supposant que ces actions ont été déterminées dans le vide ou dans un milieu presque indifférent au magnétisme.

Pour vous aider à comprendre l'effet de ces *pressions*

magnétiques développées par l'aimant dans les liquides et dans les gaz, il n'est pas tout à fait sans importance de vous faire voir que l'action éprouvée par un corps placé à une certaine distance du pôle et plongé dans un fluide est indépendante de l'épaisseur de la couche interposée entre ce corps et le pôle, ou, en d'autres termes, que l'effet produit par le milieu dépend seulement de l'action magnétique de la couche ou du volume du fluide déplacé.

Je fixe à l'extrémité du levier horizontal de la balance de torsion un cube ou une sphère de bismuth dont le centre est éloigné de 70 millimètres de la surface polaire. Si le cube est plongé dans l'eau pure, je trouve qu'il faut une torsion de 73 degrés pour le retenir dans sa position primitive, lorsque l'aimant est mis en activité. Je remplace l'eau par une dissolution de proto-chlorure de fer, et je trouve qu'il faut une force de 204 degrés pour le tenir en équilibre. En déplaçant la boîte qui contient la dissolution, je puis faire varier l'épaisseur de la couche interposée entre le bismuth et le pôle, depuis quelques millimètres jusqu'à 40 et 50 millimètres, et même davantage, sans que cet équilibre soit troublé.

Il est facile de vous montrer les effets de l'action différentielle, en employant ou des liquides ou des corps gazeux seulement. Rappelez-vous ici les gouttes d'huile qui s'éloignent des pôles lorsqu'elles sont suspendues dans un liquide ferrugineux; si, au lieu de ce liquide, j'emploie une solution saturée de chlorure de magnésium ou de calcium, les gouttes d'huile se précipitent sur les pôles.

Faraday et M. Ed. Becquerel ont fait aussi des expériences nombreuses pour étudier l'influence des milieux gazeux, et c'est ainsi qu'ils ont déterminé le magnétisme spécifique de certains gaz et surtout celui de l'oxygène.

Suivant M. Ed. Becquerel, le pouvoir magnétique de ce gaz serait, à poids égal, trois fois plus grand que celui du proto-chlorure de fer, qui est le liquide le plus magnétique qu'on connaisse.

L'importance de la détermination du pouvoir magnétique de l'oxygène est si grande que je me crois obligé de vous décrire une méthode avec laquelle on peut l'obtenir exactement. Supposons d'avoir placé entre les extrémités polaires hémisphériques un tube *ac* (*fig.* 22) de verre solidement fixé dans une position horizontale et sans qu'il touche les surfaces des pôles; on a introduit d'avance dans le tube rempli d'alcool une bulle d'oxygène, et on a disposé le tube de manière que le milieu de la bulle se trouve sur la ligne polaire. Au moment ou le circuit est fermé, la bulle paraît se contracter et, en effet, son plus long diamètre diminue d'une quantité très-distincte; si le tube a été placé de manière que la ligne polaire soit tangente à une des extrémités de la bulle, on la verrait alors s'allonger vers cette ligne. En ajoutant à l'alcool quelques gouttes de proto-chlorure de fer et en continuant à augmenter la propriété magnétique du liquide, on voit diminuer les variations de forme de la bulle d'oxygène et enfin se produire en sens contraire; c'est alors que la bulle, placée au milieu du champ magnétique, s'allonge, et, divisée en deux par le liquide, elle forme deux bulles qui s'éloignent entre elles. Une bulle d'hydrogène ou d'un autre gaz présente les mêmes phénomènes que l'oxygène, mais dans une solution moins ferrugineuse.

Remarquons d'abord que dans ce changement de forme d'une bulle gazeuse au milieu d'un liquide par l'effet de l'aimant, il ne faut point voir une variation dans la densité du gaz, ce qui, comme nous l'avons vu, serait contraire

à l'expérience, mais seulement l'action différentielle du magnétisme sur le gaz et sur la couche liquide qui l'entoure. En effet, on voit distinctement la couche liquide qui mouille les parois du tube et enveloppe la bulle gazeuse, se rassembler plus ou moins dans la ligne polaire, suivant que cette bulle paraîtra dilatée ou contractée. Il n'y a qu'à tenir le tube vertical entre les pôles et à faire ainsi loger la bulle dans la partie supérieure du tube pour rendre insensibles les variations de sa forme.

Pour déterminer le pouvoir magnétique de l'oxygène, faut le comparer avec celui d'une dissolution de protochlorure de fer. Dans la méthode que je vous décris, on cherche la dissolution ferrugineuse avec laquelle la forme de la bulle d'oxygène reste invariable sous l'action de l'électro-aimant : on peut admettre alors que les pouvoirs magnétiques de l'oxygène et de la dissolution à volumes égaux sont les mêmes. J'ai trouvé, dans la seule expérience que j'ai faite, que la bulle d'oxygène n'éprouvait plus qu'un très-petit mouvement de contraction lorsqu'elle était au milieu d'une dissolution de proto-chlorure de fer, qui contenait 6 à 7 milligrammes de chlorure sec, ou à peu près 3 milligrammes de fer à l'état de combinaison par centimètre cube. Ce nombre, quoique un peu plus petit, se rapproche beaucoup de celui trouvé par Faraday, et on n'en sera pas étonné si on réfléchit que dans mon expérience le pouvoir de l'oxygène n'était pas entièrement neutralisé, et que Faraday a employé une solution de sulfate de fer qui est une combinaison dans laquelle la propriété magnétique de l'atome de fer est moindre que dans le chlorure.

C'est avec raison qu'on attache une grande importance à la propriété magnétique si marquée du gaz oxygène,

lorsqu'on pense combien de milliards de kilogrammes de ce gaz enveloppent la terre et servent en quelque sorte d'ancre au barreau aimanté qui représente la force magnétique de la terre. Si l'on se rappelle en même temps que les expériences de Faraday et de M. Ed. Becquerel ont prouvé que la propriété magnétique de l'oxygène augmente avec sa densité et diminue par la chaleur, on ne peut s'empêcher d'attribuer à l'oxygène amosphérique une influence dans les variations du magnétisme terrestre.

Nous achèverons cette leçon en étudiant le phénomène de la polarité magnétique et principalement tout ce qui à rapport à la recherche de la polarité des corps diamagnétiques.

Nous disons qu'une aiguille aimantée a *deux pôles*, parce que nous voyons la limaille de fer attirée en grande quantité par des points placés près de ses extrémités et parce qu'en essayant son action sur l'extrémité d'une autre aiguille semblable suspendue horizontalement, nous trouvons qu'une moitié de sa longueur attire et que l'autre repousse avec une intensité qui augmente à mesure que l'on s'éloigne de son milieu. Un aimant temporaire à les mêmes propriétés qu'une aiguille aimantée d'acier, et en diffère seulement parce que ces propriétés cessent plus ou moins complétement lorsque la force inductrice a cessé d'agir. De même, si l'on a un cylindre de fer doux suspendu horizontalement, et si on approche d'une de ses extrémités le pôle d'un aimant, le cylindre de fer doux sera attiré et prendra des pôles contraires à ses extrémités; en faisant agir sur l'autre extrémité du cylindre l'autre pôle du même aimant, l'aimantation du fer doux n'est qu'augmentée. Remarquez que si on approche du cylindre

de fer en cet état un autre cylindre ou un morceau quelconque de fer doux, il en sera repoussé comme il le serait par l'influence du pôle d'un barreau aimanté du même nom que celui acquis par induction. Ce n'est qu'en mettant ce second morceau de fer doux entre le cylindre et le pôle de l'aimant qu'il y aura au contraire attraction, comme si le cylindre et le pôle étaient rapprochés. Nous savons que dans ces cas d'aimantation temporaire, toutes les particules de fer doux sont de petits aimants réunis par leurs pôles opposés dont les forces résultantes sont représentées par les pôles.

Il est important de vous faire remarquer que dans certains corps faiblement attirés par l'aimant, l'état magnétique induit n'est pas distribué uniformément et de la même manière que dans le fer doux. Nous savons déjà que dans les dissolutions ferrugineuses et dans certains mélanges homogènes de cire et de limaille de fer, l'état magnétique induit dans chaque molécule est trop faible pour qu'il y ait une action d'une molécule à l'autre, ce qui fait que ces corps, lorsqu'ils ont la même forme que les aiguilles de fer doux, se dirigent entre les pôles dans la ligne axiale, sans avoir de pôles proprement dits. Voyons, en effet, ce qui a lieu dans une aiguille d'un mélange de cire et de limaille de fer, ou dans un tube de verre rempli d'une solution ferrugineuse suspendu entre les pôles d'un électro-aimant. En fermant le circuit, on voit le cylindre attiré dans la ligne polaire où il se fixe. Certainement l'attraction entre l'électro-aimant et le cylindre de chlorure de fer prouve que chaque pôle du premier développe par induction un magnétisme contraire dans les points les plus rapprochés du cylindre; il n'y aurait qu'à agir sur le chlorure de fer ou sur un corps magnétique

quelconque avec deux barreaux aimantés réunis par leurs pôles opposés, pour qu'il n'y ait plus aucun signe d'attraction. C'est la distribution du magnétisme qui diffère dans ces corps faiblement magnétiques de celle qui a lieu dans le fer doux. En effet, si on approche un morceau de fer doux du cylindre de chlorure de fer pendant qu'il est soumis à l'électro-aimant, nous verrons que ce morceau attire le cylindre de chlorure de fer par tous les points, excepté par ceux très-rapprochés des pôles de l'électro-aimant, qui en sont repoussés.

En agissant sur le cylindre de chlorure de fer avec les pôles d'un barreau dont l'aimantation est assez forte pour résister à l'action de l'électro-aimant, les résultats qu'on trouve portent à la même conséquence quant à l'état magnétique induit dans ce cylindre; chacune des extrémités de ce cylindre a, dans les points les plus rapprochés de chaque pôle, un magnétisme contraire entouré par un magnétisme du même nom que celui du pôle inducteur; les états induits aux extrémités du cylindre ne peuvent donc, à cause de leur faiblesse, se propager dans le reste de l'aiguille. C'est ainsi que des matières faiblement magnétiques et ayant la forme d'aiguilles sont attirées près des surfaces polaires dans les points où l'action magnétique est la plus forte et se dirigent dans la ligne axiale, sans acquérir de pôles, comme l'acier et le fer doux.

Passons maintenant à l'étude de la polarité diamagnétique.

Nous avons déjà vu les expériences qui prouvent qu'il n'y a pas d'action réciproque entre les particules du bismuth soumis à l'influence de l'aimant, et que, par conséquent, il ne peut exister dans les corps diamagnétiques

une polarité telle qu'on la conçoit dans le fer doux et dans l'acier aimantés. Ceci explique comment un grand nombre de recherches, tentées dans le but de démontrer la polarité diamagnétique, n'ont pu conduire à un résultat décisif.

C'est en vain qu'on a cherché s'il existait une action quelconque entre une masse de bismuth et une aiguille de ce métal suspendue entre les pôles d'un électro-aimant. J'ai fait, à ce sujet, plusieurs expériences aussi délicates que possible, en tenant des gouttes de matière diamagnétique plongées dans une solution ferrugineuse, afin de rendre plus forts les mouvements excités par l'aimant : je n'ai jamais obtenu aucun signe d'action entre ces gouttes de matière diamagnétique, lorsqu'on a eu soin d'éviter l'effet du transport et du soulèvement du liquide ferrugineux vers la ligne polaire. On a aussi compté un grand nombre d'oscillations d'une aiguille de bismuth placée entre les pôles d'un électro-aimant, sans trouver aucune différence en plaçant à proximité de l'aiguille une lame de bismuth.

On a fait des efforts également infructueux pour fixer dans le bismuth les propriétés développées par l'aimant et pour rendre ce métal capable d'agir sur le bismuth ou sur le fer doux, après avoir éprouvé l'action magnétique. C'est ainsi que Faraday avait essayé de faire solidifier du bismuth entre les pôles d'un électro-aimant; dans le même but j'ai prolongé pendant très-longtemps l'action magnétique sur du bismuth comprimé avec une presse ou chauffé à la température la plus élevée sans arriver cependant à la fusion.

On avait cru démontrer la polarité diamagnétique en se fondant sur des mouvements qui sont excités dans une

aiguille de bismuth suspendue entre les pôles d'un électro-aimant, lorsqu'on approche de cette aiguille des barreaux aimantés ou de fer doux. J'ai répété le plus grand nombre de ces expériences en employant des aiguilles de bismuth cristallisé qui montrent sous l'influence de l'aimant des effets plus intenses que ceux qu'on obtient avec des aiguilles de bismuth amorphe. D'accord avec Faraday, je n'ai trouvé aucun de ces résultats qui ne pût être expliqué par les propriétés magnéto-cristallines du bismuth, que nous étudierons bientôt et sans recourir à l'action des pôles magnétiques développés dans ces aiguilles. Dans ces différentes expériences, l'aiguille de bismuth était sujette à l'action de plusieurs centres d'action magnétique, et sa position d'équilibre ne pouvait se trouver que dans la ligne où les résultantes de ces centres étaient les plus faibles. L'autre observation, qu'une aiguille de bismuth oscille plus rapidement en introduisant entre les extrémités polaires d'un électro-aimant un barreau de fer doux, ne prouve autre chose que l'augmentation de la force magnétique des pôles. On peut en dire autant d'une autre expérience par laquelle on a cru prouver la polarité diamagnétique de sens contraire à celle du fer, en voyant qu'un cylindre de bismuth suspendu à un bras de balance dans l'intérieur d'une bobine et en présence d'un électro-aimant, paraissait attiré lorsque les pôles voisins de l'aimant et de la bobine étaient du même nom. En effet, il doit arriver que le cylindre de bismuth, mis en équilibre lorsque l'électro-aimant et la spirale agissent avec des pôles de nom contraire, soit moins repoussé lorsque ces pôles, étant du même nom, tendent à s'affaiblir. Pour s'assurer qu'il en est ainsi, il n'y a qu'à approcher de l'extrémité d'un solénoïde le pôle du même nom d'un électro-aimant entouré

d'une seconde spirale destinée à montrer les courants induits.

Il importe d'examiner plus attentivement les expériences avec lesquelles M. Weber a cru démontrer la polarité diamagnétique. Ce savant avait d'abord déduit cette polarité des effets d'induction qu'il avait vus se produire, lorsqu'un cylindre de bismuth est approché ou éloigné du pôle d'un électro-aimant, effets qui seraient de sens contraire à ceux développés dans les mêmes circonstances que le fer doux.

Faraday, dans des expériences semblables à celles de M. Weber, ne tarda pas à trouver qu'un cylindre de cuivre ou d'argent agissait comme celui de bismuth, mais en donnant lieu à des courants induits plus intenses, ce qui prouvait que la cause de ces phénomènes était la réaction des courants induits sur l'aimant inducteur. Nous avons déjà vu, à la fin de la troisième leçon, les expériences de M. Verdet, qui ont confirmé et rendu plus rigoureuse l'explication que Faraday a donnée du résultat trouvé par M. Weber sur le bismuth.

Il fallait donc, pour prouver si l'influence d'un corps diamagnétique produit sur un aimant une variation de sens contraire à celle développée par le fer doux, opérer avec ce corps privé de conductibilité, afin d'exclure les courants induits; il fallait aussi déterminer d'avance si son action répulsive est comparable à la propriété contraire d'un corps magnétique capable de produire une induction sensibles à nos appareils. A cet effet, reprenons le grand électro-aimant (*fig.* 14) dont une des spirales sert pour le courant voltaïque et l'autre pour les courants induits. En faisant tourner en face des pôles de l'électro-aimant une lame formée d'un mélange de cire et de colco-

thar, et en ayant sur l'axe de rotation le commutateur destiné à recueillir tous les courants développés dans le même sens, on peut facilement déterminer la proportion la plus petite d'oxyde de fer qui entre dans ce mélange et qui suffit pour produire un effet d'induction assez distinct au galvanomètre. J'avais aussi déterminé, avec une approximation suffisante pour le but de ces recherches, le rapport entre les pouvoirs diamagnétiques du bismuth, de l'acide stéarique et du soufre, et le pouvoir magnétique du colcothar. A cet effet j'avais formé des mélanges aussi homogènes que possible d'acide stéarique et de colcothar, de cire et de colcothar et de poudre de bismuth, etc. J'ai soumis à l'électro-aimant ces mélanges réduits en forme d'aiguille ou de boule fixée à l'extrémité d'un levier, et je suis parvenu à déterminer assez exactement dans quelles proportions ces corps formaient le mélange le plus indifférent à l'action magnétique. J'ai trouvé que le premier de ces mélanges contenait trois cents parties d'acide stéarique et une de colcothar obtenu en calcinant le sulfate de fer. D'après les calculs fondés sur ces nombres, et en admettant dans les corps diamagnétiques une propriété analogue à celle du fer doux, mais de sens opposé, on trouve que, pour obtenir des effets sensibles à notre appareil d'induction, il faut agir avec des masses de bismuth, d'acide stéarique et de soufre trop grandes, pour qu'on puisse considérer l'action que les différents points de ces masses exercent sur l'aimant comme s'ils étaient concentrés sur la surface d'une lame d'une épaisseur infiniment petite. Quant au bismuth, dont le pouvoir diamagnétique est le plus grand, la même difficulté se présente, car on est obligé d'employer ce métal réduit en petits morceaux isolés entre eux par une couche de colo-

phane. Je devais donc m'attendre à ne trouver, comme cela m'est arrivé en effet, aucun signe d'induction en faisant tourner ou en approchant et en éloignant rapidement du grand électro-aimant de gros blocs carrés d'acide stéarique ou de soufre qui pesaient 20 à 30 kilogrammes, ou une lame formée de 8 kilogrammes de bismuth divisé en morceaux réunis par une couche de résine.

M. Weber a repris dernièrement ses recherches sur le polarité diamagnétique, en commençant par faire agir un cylindre de bismuth qu'on suspend dans l'intérieur d'une bobine verticale, sur un aimant en forme de fer à cheval dont on observe les mouvements avec le même procédé très-délicat appliqué au magnétomètre de Gauss. En faisant mouvoir de haut en bas, et *vice versâ*, le cylindre de bismuth au milieu de la bobine, de manière qu'à la fin de chaque course, tantôt l'une, tantôt l'autre des extrémités du cylindre soit portée au niveau de l'aimant, M. Weber a observé que l'aimant se mettait à osciller. Pour augmenter les oscillations de l'aimant, il a suffi de faire commencer les mouvements du cylindre de bismuth toutes les fois que l'aimant avait accompli une demi-oscillation. En substituant au cylindre de bismuth un fil de fer, les oscillations de l'aimant ont été en sens contraire. Le savant physicien en a conclu qu'un cylindre de bismuth placé dans une spirale électro-dynamique acquiert à ses extrémités des pôles magnétiques contraires et opposés à ceux qui sont développés dans un cylindre de fer doux dans les mêmes circonstances.

En lisant la description des expériences de M. Weber, on est frappé de voir les effets qu'on a obtenus en faisant mouvoir le cylindre de bismuth lorsqu'il n'y avait pas de courant transmis dans la spirale. Quoique le sens de

l'oscillation soit dans ce cas inverse à celui observé lorsque la spirale électro-dynamique était en activité, cela fait naître néanmoins des doutes sur la conclusion qu'on a tirée de ces expériences. D'ailleurs il fallait, pour déduire rigoureusement la démonstration de la polarité diamagnétique, substituer au bismuth des masses formées de fragments isolés de ce métal, varier les dimensions du cylindre et surtout comparer les effets ainsi obtenus à ceux qu'on aurait probablement avec des cylindres de cuivre et d'argent à l'état de pureté.

On est obligé de faire les mêmes remarques sur une autre série d'expériences que ce physicien a faites pour obtenir de nouveau, par des effets d'induction, la preuve de la polarité diamagnétique. Il est étonnant qu'en ayant imaginé de neutraliser le développement des courants induits par les mouvements du cylindre de bismuth à l'aide d'une disposition très-ingénieuse donnée à la spirale induite, il est étonnant, dis-je, qu'on ne se soit pas assuré d'avoir atteint le but par quelques essais préliminaires, en employant des métaux plus conducteurs et moins diamagnétiques que le bismuth et des masses discontinues de ce métal. Remarquons encore que les rapports entre les pouvoirs diamagnétiques du bismuth et le magnétisme du fer, trouvés dans ces deux séries d'expériences, présentent des différences trop grandes et inexplicables.

Je ne puis vous laisser ignorer que les doutes que nous avons osé avancer contre la conclusion des expériences de M. Weber sont appuyés par le résultat négatif auquel je suis parvenu en essayant d'exciter la polarité diamagnétique dans le bismuth par la décharge de la bouteille de Leyde. L'appareil (*fig.* 29) que j'ai employé dans ces extrémités est formé de quatre spirales cylindriques par-

faitement semblables, disposées verticalement aux quatre angles d'une base rectangulaire de bois. Les quatre spirales forment un seul circuit bien isolé et elles sont disposées de manière que les deux spirales placées sur chaque côté le plus long de la base aient les pôles du même nom à la même hauteur. Un système astatique, formé de deux barreaux d'acier, est suspendu par quelques fils de cocon au milieu des spirales avec ces barreaux au niveau des extrémités des spirales. Tout l'appareil est couvert d'une cloche et on observe avec une lunette les mouvements du système astatique. Je commence par ajuster les spirales de manière qu'en faisant passer une série de décharges dans le circuit, le système astatique reste immobile ; il faut pour cela que les extrémités des barreaux ne soient pas très-rapprochées des spirales. Je n'ai qu'à introduire dans chacune des deux spirales placées aux extrémités d'une des diagonales deux cylindres formés d'un mélange de cire et de colcothar, pour obtenir dans le système astatique des mouvements très-distincts qui sont déterminés par la position des cylindres magnétiques. En remplaçant ces cylindres par d'autres de bismuth, on trouve alors que l'équilibre des spirales n'est pas sensiblement troublé. Je m'empresse de vous faire remarqner que les quantités de colcothar et de bismuth sur lesquelles j'ai opéré dans ces expériences représentaient des actions attractives et répulsives à peu près égales entre elles, et que souvent j'ai fait excéder la quantité de bismuth.

Il est temps que nous tachions de résumer les résultats nombreux et variés obtenus en étudiant les phénomènes diamagnétiques et principalement celui de la polarité. Voici les conclusions qui me paraissent le mieux établies.

1° Une masse de bismuth amorphe, libre de se mouvoir

en tout sens, est sollicitée par le pôle d'un aimant à se transporter dans les points où l'action magnétique est la plus faible ; lorsque cette masse est de forme oblongue et suspendue horizontalement entre deux centres de force magnétique, elle doit, par l'action répulsive éprouvée par ses différentes parties, se placer en équilibre dans le plan qu'on a appelé *équatorial :* il en résulte que pour distribuer une certaine masse d'un corps diamagnétique de manière à lui communiquer la plus grande répulsion, il faut en former un disque aussi mince que possible. En faisant varier la forme des extrémités polaires de manière à modifier la distribution des forces magnétiques qui en émanent, les mouvements et les positions d'équilibre de bismuth satisfont dans tous les cas au principe établi.

2° Si le corps diamagnétique est retenu par une force quelconque sous l'influence du pôle d'un aimant, la répulsion qu'il éprouve varie approximativement avec le carré de la force magnétique ; ce corps n'est sujet à aucune modification qu'on puisse attribuer à une action réciproque quelconque développée entre ses parties. On peut théoriquement se représenter la modification que l'aimant développe dans un corps diamagnétique comme étant de sens contraire et distribuée d'une manière analogue à celle qu'on a trouvée dans les mélanges homogènes de cire et de limaille très-fine de fer, et principalement dans tous les sels ferrugineux dans lesquels il n'existe pas de polarité proprement dite.

3° Quel que soit l'état magnétique ou électrique induit dans un corps diamagnétique, cet état ne pourra pas se développer sous l'influence de deux centres magnétiques ou pôles de nom contraire, comme M. Reich l'a prouvé en agissant sur le bismuth avec les pôles opposés

de deux barreaux réunis ensemble qui forment dans les points de leur union une espèce d'anneau d'acier uniformément aimanté.

4° En voulant appliquer l'hypothèse de deux fluides magnétiques à l'explication du diamagnétisme, il faudrait supposer que les mêmes actions, également dirigées, agissent en sens contraire sur ces fluides, suivant qu'ils sont combinés ou à l'état libre, et suivant qu'ils se trouvent dans les corps magnétiques ou dans les diamagnétiques : cette supposition est contraire à tous les principes de la mécanique et de la philosophie naturelle.

SIXIÈME LEÇON.

De la relation qui existe entre les phénomènes magnétiques et diamagnétiques et les propriétés chimiques et moléculaires des corps.

Pour compléter l'exposition des phénomènes généraux du magnétisme qui a formé le sujet de la leçon précédente, il nous reste à parler de la relation qui existe entre ces phénomènes et les propriétés chimiques et moléculaires des corps.

Lorsqu'on examine les différents corps magnétiques ou diamagnétiques afin de découvrir l'existence et les lois de cette relation, on est d'abord frappé du pouvoir extraordinaire et inexplicable du fer : ce pouvoir est tellement distinct par le degré d'intensité et par la polarité, de celui que tous les autres corps acquièrent en présence de l'aimant ou d'un courant électrique, qu'on a dû le considérer pendant longtemps comme exceptionnel et propre de ce métal. Grâce à la force énorme des électro-aimants avec lesquels on agit aujourd'hui, le nombre des corps qui éprouvent l'action magnétique est considérablement augmenté et la science s'est enrichie de plusieurs exemples très-remarquables de la relation qui existe entre les pro-

priétés physico-chimiques des corps et leur magnétisme.

Commençons donc par l'étude des causes qui modifient le pouvoir magnétique du fer et nous verrons ensuite comment ces mêmes causes agissent sur les corps diamagnétiques que nous savons se comporter en présence de l'aimant d'une manière opposée à celle du fer.

Ces causes sont : l'état de combinaison chimique, la quantité variable de chaleur et la structure moléculaire.

Pour mesurer la force attractive exercée par un aimant fixe sur une substance ferrugineuse qui est ainsi magnétisée par induction, on remplit un petit cylindre de verre ou de plume d'oie de cette substance de manière à en former une aiguille, qu'on suspend entre les pôles ; on compte un certain nombre d'oscillations de l'aiguille ayant soin de les prendre très-petites et de les observer avec une lunette. Il est essentiel dans les expériences comparatives que la position de l'aiguille reste invariable, et lorsqu'on emploie un électro-aimant, il faut s'assurer que le courant reste sensiblement constant pendant toute la série des expériences ; on doit aussi donner aux extrémités polaires en fer doux, au milieu desquels l'aiguille oscille, des surfaces carrées plus larges que la longueur de l'aiguille.

Rappelons ici le résultat trouvé par Coulomb sur des mélanges homogènes de cire et de limaille de fer et que j'ai vérifié sur les dissolutions salines ferrugineuses et sur certains sels de fer cristallisés : c'est que la durée de l'oscillation reste la même pour des aiguilles de la même longueur, quel que soit leur diamètre. Nous avons déjà vu comment on interprète ce résultat, qui ne peut plus avoir lieu pour les corps doués d'une certaine force coercitive et pour de gros barreaux de fer ; dans ces cas le magnétisme

induit cesse d'être proportionnel à la masse de la substance magnétique et l'action élémentaire est d'autant moindre qu'on opère avec des barreaux d'un plus grand diamètre.

On peut donc employer la méthode des oscillations pour déterminer le pouvoir magnétique de certains composés ferrugineux faiblement magnétiques, après les avoir réduits en aiguilles de la même longueur et dont les poids et les diamètres peuvent être différents, à la condition de les suspendre à un fil de cocon très-long et autant que possible également tendu.

On a aussi employé dans des recherches semblables une autre méthode qui consiste à suspendre au plateau d'une balance, et à une distance constante du pôle d'un électro-aimant, un volume donné des différentes combinaisons ferrugineuses et à faire équilibre avec des poids à l'attraction magnétique. On peut craindre que cette méthode, dans laquelle il faut tenir compte de l'effet éprouvé par le récipient, ne présente plus de difficultés que celle des oscillations, pour obtenir la constance nécessaire dans les conditions de l'expérience.

Les deux grands obstacles qu'on rencontre pour bien réussir dans ces déterminations sont l'incertitude de la pureté des combinaisons ferrugineuses sur lesquelles on opère et la différence, quelquefois très-grande, du pouvoir magnétique de la même combinaison ferrugineuse qu'on peut attribuer à un état variable d'agrégation.

C'est ainsi qu'en rapportant le pouvoir magnétique des composés ferrugineux à celui du fer, on trouve des nombres très-différents suivant que l'on emploie de la limaille très-fine mêlée à de la cire fondue, ou du fer réduit d'un de ses oxydes par l'hydrogène; le premier mélange est constamment plus magnétique que le second. De même

on trouve que le sesqui-oxyde de fer obtenu en calcinant le proto-sulfate a un pouvoir magnétique qui est au moins six à sept fois plus grand que celui du sesqui-oxyde obtenu de l'azotate de fer par le même procédé.

A la suite de ces considérations je ne m'arrêterai pas sur les nombres qu'on a donnés pour représenter les pouvoirs magnétiques des combinaisons ferrugineuses et je vous exposerai plutôt quelques conclusions générales, qui me paraissent être assez bien établies, quant à l'influence exercée par l'état de combinaison chimique du fer et d'autres corps sur leurs propriétés magnétiques.

Quel que soit le corps avec lequel le fer entre en combinaison, son pouvoir magnétique devient toujours beaucoup moindre que celui qu'il possédait à l'état libre. Il n'y a que l'oxyde de fer magnétique (Fe^3O^4) qui fasse exception à cette règle. En considérant cet oxyde comme formé d'une combinaison de protoxyde et de peroxyde de fer, on devrait admettre que le pouvoir magnétique du protoxyde qui entre dans ce composé est plus grand que celui du fer même.

Pour toutes les autres combinaisons ferrugineuses, telles que les oxydes, les sulfures, les sels, etc., le pouvoir magnétique du fer combiné n'est plus que la centième partie et encore moins de celui de ce métal à l'état libre. Dans certaine scombinaisons salines ce pouvoir ne diffère pas de celui de l'oxyde, et dans quelques cas on a cru le trouver augmenté.

Notons ici que les pouvoirs des autres métaux qui sont attirés par l'aimant, tels que le cobalt, le nikel, le chrôme, le manganèse, le platine, etc., sont très-différents entre eux ; le pouvoir des deux premiers se rapproche beaucoup de celui du fer, tandis que les autres sont très-faibles.

En se rappelant combien le pouvoir répulsif du bismuth et des autres corps diamagnétiques est faible en comparaison de celui du fer et de ses composés, on devait s'attendre à trouver magnétiques les combinaisons du fer avec les corps diamagnétiques. Cette conséquence, généralement vraie, a néanmoins une exception très-remarquable dans le prussiate jaune de fer qui est diamagnétique, malgré 12 pour 100 de fer qu'il contient et malgré la propriété magnétique du prussiate rouge.

Pour découvrir l'influence des pouvoirs de deux éléments dont l'un est magnétique et l'autre diamagnétique sur le pouvoir de leur combinaison, il fallait employer des substances faiblement attirés ou repoussés par l'aimant.

Nous avons déjà vu que l'argent et le cuivre réduits à l'état de grande division sont des métaux faiblement diamagnétiques, et en effet ils sont repoussés par l'aimant et oscillent avant de se fixer à une certaine distance de pôle, comme font le bismuth et le phosphore. Ces mêmes métaux à l'état de poudre, étant suspendus dans un cylindre de paille ou de plume d'oie, sont repoussés des pôles et se fixent dans la ligne équatoriale après avoir fait plusieurs oscillations.

Voici maintenant les résultats que j'ai trouvés en étudiant l'action de l'aimant sur les différentes combinaisons de ces métaux. L'oxydule de cuivre, l'oxyde de bismuth, l'oxyde le chlorure et le nitrate d'argent sont des composés diamagnétiques. L'oxyde de cuivre est magnétique, et je pourrais vous montrer le même cuivre tantot attiré et tantôt repoussé par l'aimant suivant qu'il est oxydé à l'air ou réduit dans le gaz hydrogène.

Le bioxyde d'argent qu'on obtient en petits cristaux noirs au pôle positif en décomposant le nitrate d'argent

avec le courant, est magnétique. L'acide antimonieux est repoussé par l'aimant et l'acide antimonique est attiré. Ainsi donc en opérant avec des corps sur lesquels l'action de l'aimant est faible, on trouve que le pouvoir magnétique ou diamagnétique des combinaisons dépend de celui de leurs éléments et de la proportion dans laquelle ces éléments y entrent.

Nous devons encore remarquer qu'en étudiant l'influence de l'état de combinaison sur les propriétés magnétiques du fer, il faut avoir égard aux modifications très-grandes que certains corps, même en très-petite quantité, apportent dans la structure et dans l'état d'agrégation de ce métal ; c'est là ce qui arrive en mêlant au fer des traces de charbon, de soufre, d'arsenic, etc.

De même que la division moléculaire qui accompagne nécessairement la combinaison chimique, la force répulsive de la chaleur en éloignant les molécules du fer et de l'aimant, en diminue le pouvoir magnétique.

Décrivons d'abord les effets de la chaleur sur l'aimant. Les expériences sur la diminution du pouvoir de l'aimant lorsqu'il est chauffé à des températures très-élevées sont déjà anciennes, et Gilbert, Newton dans l'Optique, Cavallo, etc., en parlent plus ou moins contradictoirement. Il n'y a qu'à chauffer une aiguille aimantée à la flamme d'une lampe à alcool et à la maintenir un certain temps à la température de rouge cerise, pour la trouver après sans pôles et semblable à un morceau de fer doux.

C'est à Coulomb que nous devons des expériences exactes sur ce sujet et on doit savoir gré à M. Biot de les avoir recueillies et coordonnées avec l'ordre et la clarté qui lui sont propres. Coulomb, après avoir chauffé à une température très-élevée un barreau d'acier, le fit refroidir dans

l'air lentement pour qu'il ne prît aucune trempe : ensuite il l'aimanta à saturation à la température de 12° R. et il mesura le temps qu'il employait à faire 10 oscillations horizontales. Il éleva alors la température du barreau à 40° et mesura de nouveau le temps de 10 oscillations après l'avoir laissé refroidir. Cette opération ayant été répétée de la même manière à diverses températures de plus en plus élevées, Coulomb trouva que la durée des oscillations augmentait progressivement, ce qui prouve que le magnétisme du barreau s'affaiblit à mesure qu'on le chauffe à des températures plus élevées.

Dans une autre série d'expériences, Coulomb a commencé par donner au barreau la trempe la plus dure possible ; il a mesuré ensuite le temps que le barreau employait à faire 10 oscillations horizontales, après avoir été successivement chauffé et réduit à des températures plus élevées. La diminution du magnétisme par la même élévation de température a été trouvée beaucoup plus grande sur ce second barreau, qui avait la trempe la plus dure, que sur le premier, qu'on avait pris à l'état complet de recuit. Il y a encore une autre différence que Coulomb a observée dans l'état de ces deux barreaux lorsqu'ils avaient été également chauffés : c'est que le barreau à l'état de recuit, étant aimanté de nouveau, reprend tout son magnétisme, tandis que celui à l'état de trempe, après chaque élévation de température, n'acquiert plus qu'une partie du magnétisme qu'il pouvait recevoir par une nouvelle aimantation.

Il résulte donc de ces expériences que l'action de la chaleur sur l'aimant est d'autant plus grande que la variation qu'elle détermine dans son état moléculaire est plus grande et permanente.

M. Kupffer, qui a fait des expériences intéressantes sur l'action de la chaleur sur l'aimant, a confirmé les résultats trouvés par Coulomb et a montré de plus que de 0° à 30° R. chaque dégré d'élévation de température augmente à peu près de la même quantité la durée d'un nombre égal d'oscillations.

On doit à ce même physicien l'observation importante qu'il faut un temps assez long pour qu'une température donnée produise toute la diminution de magnétisme dont elle est capable : ainsi une aiguille qui a été plongée à plusieurs reprises dans l'eau bouillante, où elle restait dix minutes chaque fois, n'a perdu qu'à la sixième immersion tout le magnétisme qu'elle pouvait perdre.

J'ai à vous parler encore d'une expérience qui confirme les résultats précédents et prouve en même temps l'influence de la chaleur sur la distribution du magnétisme dans un barreau. Voici une aiguille de boussole à côté de laquelle je place parallèlement un barreau aimanté avec leurs pôles opposés du même côté. Pour que l'aiguille reste dans le méridien magnétique, il faut que son point d'indifférence et celui du barreau se trouvent sur la même ligne perpendiculairement à l'aiguille : pour peu que le barreau se déplace, en le laissant toujours parallèle à l'aiguille de sorte que son point d'indifférence se rapporte d'un des pôles de l'aiguille, on verra ce pôle repoussé parce que le pôle opposé est plus fortement attiré par le pôle correspondant du barreau qui s'est approché.

Remettons le barreau dans sa première position, c'est à dire où la déviation de l'aiguille est nulle, et en chauffant l'un des pôles du barreau avec une lampe à alcool, nous verrons immédiatement le pôle contraire de l'aiguille attiré et retourner ensuite à peu près dans le méridien lors-

que le barreau se sera refroidi. La force magnétique du pôle chauffé étant diminuée, le point d'indifférence s'est éloigné de ce pôle.

Si l'on répète cette expérience en faisant plonger une des extrémités du barreau dans un mélange réfrigérant, on trouvera un effet contraire, c'est-à-dire que le pôle de l'aiguille contraire à celui du barreau sera repoussé. M. Christie aurait trouvé, en abaissant la température d'un barreau aimanté par l'évaporation du sulfure de carbone dans le vide, que l'intensité de son magnétisme continue à augmenter jusqu'à la température la plus basse.

Passons à étudier l'influence de la chaleur sur le fer soumis à l'induction magnétique.

En substituant au barreau aimanté, dans l'expérience que je vous ai montrée dernièrement, un barreau de fer doux, de manière que l'aiguille reste toujours dans le méridien magnétique, on a ce barreau aimanté par l'action de la terre, et par conséquent les pôles du même nom se trouvent du même côté. Lorsqu'on chauffe une des extrémités de ce barreau, c'est le pôle de l'aiguille le plus rapproché de cette extrémité qui est attiré. Puisque, dans ces expériences, les pôles du même nom sont tournés du même côté, on voit que le barreau de fer doux se comporte, par l'action de la chaleur, d'une manière opposée à celle de l'aimant, c'est-à-dire que le magnétisme induit par l'action toujours présente de la force terrestre augmente par la chaleur et donne lieu au rapprochement du point indifférent de ce barreau à l'extrémité chauffée.

Je puis vous démontrer cette propriété du fer doux avec une expérience encore plus simple et plus évidente. Je reprends l'inductionomètre différentiel (*fig.* 7 *bis*) formé

avec les deux bobines cylindriques, ou plutôt j'en forme un semblable avec deux bobines d'un diamètre plus petit. Je coupe sur un fil de fer parfaitement recuit deux morceaux de la même longueur, et, après avoir placé chacun de ces morceaux dans un tube de verre rempli d'huile ou de mercure, j'introduis un de ces tubes dans chaque bobine. En faisant agir la roue d'interruption, je vois l'aiguille fixée à 0°. J'enlève un des fils de fer de son tube et je chauffe légèrement avec la flamme d'une lampe à alcool le liquide de ce tube. Alors, en remettant le fil dans le tube, et celui-ci dans la bobine, je trouve que l'équilibre des deux spirales n'existe plus et que le magnétisme développé dans le fil chauffé est augmenté. Si l'on avait employé du fil de fer recuit incomplétement, l'augmentation dans son magnétisme, due à l'élévation de la température, persisterait après le refroidissement.

Concluons donc que le magnétisme induit dans le fer doux augmente avec la chaleur jusqu'à une certaine température, qui varie avec la structure de ce métal, la masse soumise à l'expérience et la durée de l'échauffement.

Ce résultat cesse d'avoir lieu pour les températures très-élevées, et on a douté jusqu'à ces derniers temps si le fer chauffé jusqu'à la température du rouge cerise et au-delà conservait encore la propriété d'être attiré par l'aimant.

Faraday a observé qu'un fil de fer chauffé le plus possible à la flamme de l'alcool est très-faiblement attiré par un fort électro-aimant.

Il était donc important d'opérer sur le fer chauffé jusqu'à son point de fusion, et voici comment j'ai exécuté cette expérience, dont le résultat est décisif.

Je fixe à l'extrémité d'un levier horizontal de bois, sus-

pendu à un fil de cocon, une tige de chaux caustique, ou de coke, ou de cuivre, ayant une très-petite cavité à son extrémité. L'appareil est disposé de manière que cette cavité se trouve très-près et en face du pôle ou des pôles réunis d'un électro-aimant. Un petit bout de fil de fer, qui pèse 20 à 25 milligrammes, est placé dans la petite cavité et fondu avec la flamme du gaz oxy-hydrogène. Au moment où l'on voit le fil de fer réduit à un globule parfaitement liquide, on ferme le circuit et on voit le *globule attiré*. J'ose à peine vous donner ici les nombres qui représentent la diminution de la force magnétique éprouvée par le fer à l'état de fusion. Certainement on n'est pas trop loin de la vérité en disant que le fer fondu, ou plutôt le mélange de fer et d'oxyde de fer à l'état liquide, est attiré par un aimant avec une force qui n'est plus que la *quinze millionième* partie de celle qu'il éprouve à la température ordinaire.

Tous les composés de fer, les oxydes, les sulfures, etc., que j'ai soumis à la même source de chaleur, ont aussi leurs propriétés magnétiques tellement diminuées, qu'on peut à peine les rendre sensibles avec un électro-aimant très-fort. On trouve un résultat semblable lorsqu'on fait monter entre les pôles d'un électro-aimant la colonne de fumée jaune qui se soulève de l'arc voltaïque obtenu entre deux pointes de fer; cette colonne de fumée, qui n'est autre chose que l'oxyde de fer à une température très-élevée, entraînée par l'air chauffé, est si faiblement influencée par l'aimant, qu'on reste dans le doute si dans cet état l'oxyde de fer est attiré, repoussé ou indifférent.

La grande diminution de magnétisme qui se produit dans les composés ferrugineux fortement chauffés nous explique les effets singuliers présentés par certains mé-

taux ou par d'autres corps contenant des traces de fer, qui sont chauffés en présence de l'aimant. L'argile, certaines chaux et charbons de terre, le cuivre et l'or du commerce réduits en petits globules, attirés par l'aimant à la température ordinaire, sont décidément repoussés à une température élevée. Lorsque ces corps sont chauffés, l'action diamagnétique devient prépondérante sur l'attraction de la petite quantité de fer qui y est contenue et qui est considérablement diminuée par la chaleur. Avec le refroidissement, le pouvoir magnétique reparaît et on peut reproduire autant qu'on veut ces alternatives.

Avant d'abandonner ce sujet, je dois vous signaler l'influence de la chaleur sur le pouvoir magnétique du platine, métal très-doux et très-malléable, surtout en comparaison du fer; ce pouvoir se conserve à des températures très-élevées et paraît à peine diminuer par la fusion. Notons encore que les solutions ferrugineuses conservent sensiblement leur pouvoir magnétique entre les limites des températures auxquelles on peut les soumettre.

Les roches de fusion, telles que les laves et les basaltes, ont été trouvées aimantées, et en coupant sur des couches en place, comme l'a fait récemment M. Melloni, des prismes dans des directions différentes, il en est résulté que les pôles contraires de ces prismes étaient disposés comme dans une masse ferrugineuse qui aurait été aimantée par l'action magnétique de la terre. Puisque ce résultat n'aurait pas lieu sur les mêmes corps à l'état solide et à la température ordinaire, il faut admettre que l'induction de la force magnétique terrestre s'est exercée lorsqu'ils étaient chauffés et, par conséquent, privés de force coercitive.

Voyons maintenant quelle est l'action de la chaleur sur

les corps diamagnétiques et principalement sur le bismuth. N'oublions pas que nous passons ainsi de l'étude d'un métal fibreux, ductile et doué d'une grande cohésion, comme le fer, à celle du bismuth, qui est un corps cristallisé et très-friable.

Je commence par faire une expérience qui vous montrera la grande diminution qu'éprouve le diamagnétisme du bismuth par la fusion. Je suspends à un fil de cocon un levier formé d'une tige très-légère de bois qui porte à son extrémité une petite cuiller de chaux caustique *a* (*fig.* 23) dans laquelle je répands une trace à peine visible de coliothar. En fermant le circuit de l'électro-aimant au moment où la cuiller est près d'un des pôles, l'aiguille est attirée; mais si je remplis la cavité avec du bismuth, l'aiguille est de nouveau repoussée. En supposant que la quantité d'oxyde de fer n'excède pas 1 à 2 milligrammes, il faut mettre, pour vaincre son attraction, 200 à 250 milligrammes de bismuth. Je chauffe la cuiller de chaux avec une lampe à alcool, et je ferme le circuit lorsque le bismuth est entièrement fondu et que la chaux est presque rouge. L'aiguille est alors attirée et s'attache au pôle. Si nous faisons attention au moment où le bismuth se solidifie, moment qui est indiqué par l'apparition d'une petite boule liquide qui fait crever la surface, nous verrons l'aiguille brusquement repoussée du pôle.

M. Plucher avait déjà remarqué que le diamagnétisme du bismuth diminue très-rapidement près de la température de sa fusion.

Je vais maintenant vous montrer les expériences par lesquelles j'ai été amené à conclure que le pouvoir diamagnétique du bismuth diminue presque uniformément

avec la température jusqu'au point de fusion, auquel il cesse brusquement. Pour opérer sur le bismuth à des températures de plus en plus élevées, mais inférieures à sa fusion, je faisais osciller une aiguille de ce métal suspendue à un fil de cocon dans un espace d'air chauffé avec un bain d'huile : j'ai trouvé que la diminution du pouvoir diamagnétique est à peu près proportionnelle à l'augmentation de température, jusqu'à + 226° C, qui est le degré le plus élevé auquel j'aie pu faire l'expérience. Afin de pouvoir agir sur le bismuth liquide, je prends une nacelle de chaux caustique suspendue (*fig.* 24) par un long crochet de verre à un fil de cocon. Je fais osciller cette nacelle entre les pôles d'un électro-aimant après l'avoir fortement chauffée, et je mesure le temps d'un certain nombre d'oscillations; je répète ensuite la même expérience en ayant la nacelle fortement chauffée et remplie de bismuth fondu. Dans les deux expériences, j'ai eu soin d'avoir le fil de cocon également tendu. J'ai trouvé que la durée de l'oscillation de l'aiguille de chaux était à peu près la même dans les deux cas. Il était essentiel de faire l'expérience avec la nacelle vide après l'avoir fortement chauffée, à cause de l'augmentation déjà observée du diamagnétisme de la chaux par la chaleur.

En partant de ce résultat, il était de quelque intérêt d'essayer si, en augmentant la masse du bismuth relativement à celle de la chaux de la nacelle, on serait parvenu à trouver dans ce métal fondu une propriété contraire au diamagnétisme dont il est doué à l'état solide. Je n'ai pas réussi à vérifier cette inversion, et j'ai vu la nacelle de chaux, contenant 27 grammes de bismuth fondu, toujours repoussée des pôles de l'électro-aimant.

En ayant égard à la structure cristalline du bismuth,

il était important d'étudier sur d'autres corps diamagnétiques, l'influence de la chaleur. J'ai trouvé que la force répulsive développée par l'aimant sur le phosphore, l'acide stéarique et le souffre n'était que très-peu diminuée par la fusion.

Il est donc démontré par des expériences suffisamment variées que l'influence de la chaleur sur les pouvoirs magnétiques et diamagnétiques des corps, varie suivant le degré de la modification qu'une quantité donnée de chaleur produit dans l'attraction moléculaire et dans la structure cristalline de ces corps.

Nous allons voir que des effets de la même nature que ceux produits par la chaleur sont développés dans les corps magnétiques et diamagnétiques par l'influence de ces actions mécaniques, qui troublent temporairement l'équilibre de leurs molécules et font varier inégalement et dans des sens différents la force d'agrégation.

Il n'y a qu'à se procurer des barreaux semblables de fer doux, d'acier fondu non trempé, de cet acier plus ou moins trempé et à les placer successivement avec leur axe parallèle à l'aiguille d'inclinaison, pour voir l'aiguille d'une boussole placée à une certaine distance dévier d'un certain nombre de degrés qui varie suivant la nature du barreau : le fer doux est celui qui prend, sous l'influence de l'aim nt terrestre, le magnétisme le plus fort, et c'est le contraire qui a lieu pour l'acier trempé.

Après avoir enlevé ces barreaux de la position où ils étaient maintenus pour les soumettre à l'action inductrice du magnétisme terrestre, on peut mesurer, en les approchant de nouveau de l'aiguille de la boussole, le degré d'aimantation qu'ils ont conservé : on trouvera alors un résultat tout à fait contraire au précédent, c'est-à-dire que

le fer doux aura perdu entièrement l'état magnétique acquis sous l'induction de la terre, tandis que la portion du magnétisme conservée par l'acier trempé sera plus grande que celle de l'acier non trempé. C'est à Coulomb que nous devons les expériences les plus exactes pour démontrer l'influence de la trempe sur l'aimantation acquise par un barreau d'acier. Ce physicien a trouvé que ce barreau, chauffé jusqu'à + 750° R. et brusquement refroidi, n'acquiert pas un état de trempe suffisant pour faire varier le magnétisme qu'il prenait avant cette opération. C'est après l'avoir trempé à des températures plus élevées et puis aimanté, qu'on trouve sa force directrice notablement augmentée : à la température de 950° la trempe rend le barreau susceptible d'un degré d'aimantation double de celui qu'il avait avant la trempe. On conçoit facilement que ces effets doivent varier suivant la nature de l'acier, la dimension et la forme des barreaux. Je citerai encore à ce propos une expérience que Nobili avait faite pour expliquer la manière d'agir de la trempe dans l'aimantation. Ce physicien fit construire avec le même acier deux cylindres égaux, l'un massif et l'autre percé suivant son axe de manière que son poids ne fût que la moitié de l'autre. Ces deux cylindres furent trempés de la même manière et aimantés à saturation, et le magnétisme acquis par le cylindre percé fut trouvé double de celui de l'autre. Ce résultat dépend évidemment du refroidissement plus brusque éprouvé par le cylindre percé et de la trempe plus dure qui en est résultée.

En se fondant sur un résultat trouvé par Coulomb, c'est-à-dire que, dans un faisceau de lames ou d'aiguilles également aimantées, l'aimantation la plus forte est bientôt réduite aux seules lames externes, tandis que celles

du centre sont à peine magnétisées ou le sont en sens contraire, Nobili a essayé d'expliquer l'effet de la trempe en l'attribuant à l'aimantation plus forte prise par la couche superficielle d'un barreau qui est celle dont la trempe est la plus dure. Quoiqu'on ne puisse nier l'influence que cette couche plus fortement aimantée doit exercer pour conserver le magnétisme du barreau en réagissant sur la partie centrale de la même manière que les pôles des aimants font sur les armatures de fer doux, il n'est pas moins vrai que l'explication de l'aimantation plus forte de cette couche à cause de sa dureté, reste à donner.

Dans l'hypothèse de Coulomb on admet dans l'acier, proportionnellement au degré de sa trempe, une force appelée *force coercitive*, qui s'oppose à la séparation des fluides magnétiques et qui résiste aussi à leur réunion : la quantité de magnétisme que le corps peut conserver à son point de saturation, dépendrait de sa force coercitive.

De même que la trempe agit sur le magnétisme pris par l'acier, toutes les actions mécaniques qui modifient la structure du fer doux et le rendent plus ou moins dur et élastique, communiquent à ce métal la propriété de conserver l'aimantation.

Le procédé le plus propre à rendre sensibles les variations que les actions mécaniques développent dans les propriétés magnétiques d'une masse de fer, consiste à placer cette masse dans l'intérieur d'une double spirale dont l'une est employée pour le courant de la pile et l'autre pour les courants induits par les variations de l'état magnétique.

Je ferai la première application de ce procédé en vous montrant les effets de la compression sur une masse de

limaille de fer contenue dans un étui de laiton portant un piston à vis, avec lequel je puis comprimer plus ou moins cette masse. En fermant le circuit après avoir placé l'étui dans l'intérieur de la spirale on a une première déviation très-forte due principalement au courant induit par la magnétisation de la limaille; si, après avoir laissé retourner l'aiguille à zéro, on comprime cette limaille, on obtiendra encore des courants très-forts et dans le même sens, et le contraire aurait lieu en diminuant brusquement la compression ou en agitant la limaille.

Mais c'est surtout avec le grand appareil d'induction déjà décrit (*fig.* 14), que je puis vous montrer des effets très-grands développés par des dérangements moléculaires à peine sensibles. Je ferme d'abord le circuit de la pile et je laisse passer plusieurs secondes avant de fermer le circuit de la spirale induite qui contient un galvanomètre très-délicat; sans cette précaution j'aurais toujours un courant induit très-fort dû au magnétisme du cylindre de fer doux, qui n'atteint son *maximum* qu'après 60 à 80 secondes. Après ce temps, quelque petit que soit le choc, ou la vibration, ou la pression exercée sur le cylindre de fer doux, j'obtiens des courants induits très-forts qui indiquent la formation ou l'accroissement du magnétisme du fer doux. En opérant de la même manière après que le circuit a été ouvert, ces actions mécaniques produisent des courants à peu près de la même intensité mais de sens contraire, et l'on doit remarquer que ces courants sont les mêmes, soit qu'on ait agi quelques secondes après l'interruption du circuit ou après plusieurs heures ou même des jours entiers.

Parmi les différentes actions mécaniques qui peuvent être appliquées au fer doux pendant qu'il est soumis à

un aimant, c'est la torsion qui a offert les résultats les plus importants. Voici comment j'ai opéré, il y a déjà longtemps, pour étudier les effets de la torsion sur un barreau de fer doux aimanté à saturation par un courant électrique. Un barreau de fer doux bien recuit (*fig.* 28) est fixé à une de ses extrémités *d* dans un trou profond pratiqué dans un bloc de marbre qui est à son tour fixé solidement dans un mur; l'autre extrémité *c* est appuyée sur un support et porte un levier ou une roue à l'aide desquels on peut donner au barreau des torsions déterminées et dans les deux sens. Le barreau est entouré d'une spirale *ab* destinée au courant, de la pile et d'une seconde spirale qui comprend le galvanomètre et sert pour les courants induits. On a eu soin de placer l'axe du barreau autant que possible perpendiculaire au méridien magnétique. En employant l'action magnétique de la terre pour aimanter le barreau, on emploie la seule spirale induite, et il faut alors placer le barreau verticalement ou parallèlement à l'aiguille d'inclinaison.

Quelle que soit la disposition de l'appareil dont on se sert pour étudier les effets de la torsion, le premier résultat de la torsion est celui d'une augmentation du magnétisme du barreau, indiquée par les courants induits, quels que soient le sens et le degré de la torsion qu'on lui applique. M. Pouillet est parvenu à aimanter à saturation un barreau de fer doux soumis au magnétisme de la terre en lui donnant des torsions très-fortes. Si l'on répète les torsions sur le barreau après que le courant a cessé, les courants induits qu'on obtient indiquent une diminution de magnétisme.

Voici maintenant un phénomène remarquable que j'ai obtenu sur un barreau de fer doux qui avait 40 milli-

mètres de diamètre. En donnant à ce barreau des torsions, qui étaient nécessairement très-fortes et qui étaient accompagnées d'une altération permanente dans son état moléculaire, j'ai eu, immédiatement après le passage du courant, des effets d'induction qui indiquaient l'accroissement du magnétisme. En continuant avec les mêmes torsions qui étaient données alternativement dans des directions opposées, les courants obtenus devenaient toujours plus faibles et enfin j'ai vu apparaître des courants de sens contraire qui se succédaient et correspondaient à des mouvements opposés communiqués au barreau.

Dans ces expériences je n'avais pas opéré de manière à distinguer les effets de la torsion élastique de ceux produits par les torsions capables d'altérer d'une manière permanente la structure du barreau : c'est là en partie le travail que M. Wertheim a exécuté dernièrement, en y apportant les soins et l'exactitude qui lui sont propres.

Ce physicien a étudié les effets de la torsion avec la méthode que j'ai déjà décrite : dans ses expériences un barreau de fer doux de 15 millimètres de diamètre, aimanté ou par le magnétisme de la terre ou par un courant électrique, était tordu et détordu à l'aide d'une roue au centre de laquelle était fixé le bout libre du barreau. Les variations qui se produisaient dans le magnétisme du barreau étaient indiquées par les courants développés dans la spirale induite.

M. Wertheim a commencé par soumettre le barreau à une torsion élastique ou temporaire et ensuite à la détorsion. Il a trouvé que les variations d'équilibre moléculaire ainsi produites agissaient d'abord comme tout autre ébranlement mécanique, en augmentant le magnétisme

du barreau jusqu'au point de saturation. A ce point la torsion élastique, quel que soit le sens dans lequel elle se fait, produit une diminution de magnétisme, tandis que la détorsion correspondante donne lieu à une augmentation à peu près égale de magnétisme. Ces mêmes phénomènes se produisent sur le même barreau après l'interruption du courant, précédés toutefois par les variations que les premières torsions et détorsions produisent dans son magnétisme en le ramenant à un état d'équilibre.

Il paraît naturel de considérer ces premiers résultats des expériences de M. Wertheim comme conformes à ceux, certainement plus complexes, auxquels j'étais parvenu en opérant sur des barreaux d'un diamètre beaucoup plus grand, ce qui ne m'a pas permis de distinguer suffisamment l'effet de la détorsion de celui de la torsion en direction contraire à celle qu'on a appliquée premièrement au barreau ; la même raison m'a empêché de déterminer le sens de la variation magnétique, qui correspond à la torsion du barreau et à son retour à la position primitive.

M. Wertheim a étudié ensuite les effets de la torsion sur un faisceau de fil de fer tordu d'une manière permanente et soumis à l'action magnétique de la terre ou à celle d'un courant voltaïque. La variation magnétique éprouvée par le faisceau de fils de fer tordus et soumis à une nouvelle torsion élastique, ne serait plus, suivant M. Wertheim, indépendante de la direction dans laquelle la torsion est exercée, car elle produirait une augmentation de magnétisme si elle était dans le même sens que la torsion permanente, et un effet contraire si la torsion avait lieu dans le sens opposé. De même la détorsion augmenterait le magnétisme si elle avait lieu dans la di-

rection de la torsion permanente et produirait une diminution si elle s'exerçait contre le sens de cette torsion.

Il nous a été facile de vérifier l'exactitude de ces résultats obtenus par M. Wertheim, et je vous ai déjà décrit l'appareil (*fig.* 28) avec lequel j'ai pu répéter ces expériences.

Frappé de la différence ou plutôt de l'opposition des effets de la torsion temporaire sur des barreaux de fer doux et de ceux obtenus par la même cause sur des faisceaux de fils de fer soumis précédemment à une torsion permanente, j'ai recherché si ces barreaux placés dans les mêmes conditions éprouveraient les mêmes effets que les faisceaux. On pouvait soupçonner que les résultats obtenus sur les faisceaux de fils de fer étaient dus tout simplement au rapprochement plus intime de ces fils par la torsion et à la séparation produite par les torsions exercées en sens contraire de celles déjà appliquées à ces faisceaux. J'ai trouvé en effet qu'en tenant sous une torsion permanente des barreaux de fer doux déjà à l'état d'équilibre magnétique, les nouvelles torsions et détorsions élastiques ajoutées, quel qu'en ait été le sens, ont toujours produit les mêmes résultats que nous avons obtenus sur des barreaux dont l'élasticité n'a pas été altérée, c'est-à-dire diminution du magnétisme par la torsion et augmentation par la détorsion.

J'ai vérifié ces résultats en employant la force magnétique de la terre pour aimanter les barreaux, au lieu du courant électrique, et je n'ai pas remarqué de différence en laissant écouler un intervalle différent de temps, depuis quelques secondes jusqu'à plusieurs minutes et même plusieurs heures entre la torsion permanente et le commencement de la nouvelle torsion élastique.

Il importe ici de vous décrire un phénomène qui se vérifie constamment dans ces expériences, et qui, étant pris isolément, pourrait nous conduire à considérer la torsion permanente comme vraiment capable de modifier le résultat des torsions temporaires successives. Lorsqu'un barreau de fer doux a été plusieurs fois de suite soumis à des torsions croissantes jusqu'au point d'altérer son élasticité, s'il est alors soumis à une très-faible torsion élastique toujours dans le même sens, on a généralement augmentation de magnétisme et la détorsion correspondante ne produit qu'une diminution très-faible et souvent inappréciable. En continuant les torsions, les premiers phénomènes paraissent, c'est-à-dire *désaimentation* en tordant et aimantation en détordant le barreau. On peut alors renouveler la même série de phénomènes en recommençant les torsions élastiques dans le sens primitif : on trouve de nouveau que la première torsion, lorsqu'elle est très-petite, donne toujours une augmentation de magnétisme. Ces alternatives peuvent se répéter un grand nombre de fois et d'autant plus longuement que le barreau employé a été moins recuit. Evidemment il faut considérer l'effet d'une première et faible torsion sur les molécules, venant à la suite de torsions très-fortes en sens contraire, comme semblable à celui de la détorsion.

Pour compléter la description de ces phénomènes, je dois ajouter que le sens dans lequel la torsion élastique appliquée à des barreaux déjà assujettis à des torsions permanentes donne l'augmentation du magnétisme avec plus d'intensité et de persistance, a été généralement celui dans lequel la première torsion a eu lieu.

Avant de vous exposer les considérations auxquelles on est conduit par ces expériences sur la relation entre les

effets moléculaires de la torsion et l'état magnétique du fer, je dois vous décrire encore les résultats que j'ai obtenus en étudiant les effets de l'allongement élastique et du raccourcissement correspondant dans un fil de fer soumis à l'aimantation. C'est encore le même appareil et la même méthode qui ont été employés dans ces expériences : un fil de fer de $2^{mm}\frac{1}{2}$ de diamètre est solidement fixé par une de ses extrémités à une forte pince de fer, tandis que l'autre extrémité passe sur une poulie et se termine par un crochet auquel on attache des poids. Ce fil, d'une longueur de 2 mètres environ, est enveloppé de deux spirales dont l'une sert pour le courant électrique qui doit l'aimanter, et l'autre pour les courants induits qui dénotent les variations de son magnétisme. J'avais disposé un mécanisme très-simple, à l'aide duquel je pouvais soumettre brusquement et soustraire successivement le fil à des tractions de 50 à 100 et 150 kilogrammes. J'avais soin de m'assurer en même temps que l'allongement n'altérait pas l'élasticité, en observant avec la lunette du cathétomètre un trait fait sur le fil. Voici le résultat auquel je suis parvenu ; l'allongement élastique d'un fil de fer, soumis au courant et qui a atteint un état d'équilibre magnétique, produit une augmentation de magnétisme, tandis que le retour de ce fil à sa première longueur produit une diminution de magnétisme.

Pour bien réussir dans ces expériences, il est avantageux d'employer un fil qui n'ait pas été trop recuit et de lui appliquer d'avance le poids nécessaire pour le maintenir tendu. J'ai remarqué que, lorsque les poids ajoutés étaient trop grands et produisaient l'allongement et enfin la rupture du fil, une diminution brusque de magnétisme avait lieu dans le moment du grand allongement qui pré-

cédait la rupture, ce qui s'explique naturellement par la diminution correspondante du diamètre du fil soumis à l'aimantation.

En rapprochant les résultats obtenus par l'allongement du fil de ceux produits par la torsion, on arrive à cette conséquence remarquable : l'allongement d'un fil de fer et la détorsion, dans les limites de l'élasticité, produisent la même variation dans son état magnétique qui consiste dans une augmentation de cet état, tandis que le raccourcissement de ce fil et sa torsion produisent l'effet contraire, ou une diminution de magnétisme ; quelle que soit l'action mécanique à laquelle est soumis un fil de fer en présence d'une force qui le transforme en aimant, si les molécules du fer sont portées à des distances plus grandes entre elles, il y a augmentation de magnétisme, tandis qu'il y a diminution lorsque ces molécules sont rapprochées.

On devait s'attendre à trouver ces résultats confirmés par une autre manière d'expérimenter.

Si l'allongement et la détorsion d'un fil de fer soumis à un courant électrique dans une spirale produisent une augmentation brusque de magnétisme, on doit trouver qu'un fil de fer allongé par une force de traction prend, sous l'influence d'une force inductrice donnée, un état magnétique plus fort qu'un autre fil semblable qui est à l'état naturel, et que la même différence se vérifie entre un fil de fer à l'état naturel et ce même fil tordu. Nous pouvons facilement vérifier ces conséquences avec l'inductionomètre différentiel (*fig.* 7 *bis*), qu'il est utile de construire avec deux petites bobines dont chacune est formée de deux spirales cylindriques de $0^m,10$ de longueur et de 12 millimètres de diamètre à l'extérieur. Je commence par m'assurer que les deux spirales induites se font parfaite-

ment équilibre. A ce point l'appareil a toute la sensibilité et toute l'exactitude possibles dans ses indications, et nous pourrions, si cela était nécessaire, augmenter à volonté la force de la pile et la longueur des spirales. Pour vous montrer la sensibilité de cet appareil, je n'ai qu'à mettre dans une des spirales un cylindre formé d'un mélange de parties égales de cire et de coliothar; j'obtiens alors, en faisant agir la roue d'interruption, une déviation notable due à la prédominance acquise par la spirale qui induit sur la matière ferrugineuse.

Voyons maintenant quels sont les effets de la torsion et de l'allongement. Je mets dans chaque bobine un fil de fer coupé sur le fil employé dans les expériences précédentes sur l'allongement; les deux fils sont égaux et assez longs pour que leurs extrémités dépassent celles des spirales. Je puis facilement tordre ces fils, après avoir serré fortement avec des pinces de laiton chacune de leurs extrémités, je m'assure de l'équilibre des deux spirales, et puis je tords un des fils d'un arc de 90° en tenant fixe une de ses extrémités. L'équilibre n'existe plus, et la spirale qui a le fil de fer à l'état naturel donne un courant induit plus fort. En détordant le fil, les deux courants redeviennent égaux. On peut ainsi, sur ces deux fils ou sur d'autres plus épais, produire plusieurs fois ces alternatives dans la prédominance de l'une ou de l'autre des spirales. Il suffit de donner une torsion persistante pour obtenir aussi la persistance dans la diminution de la force magnétique, que le fil de fer peut acquérir temporairement sous l'action d'un courant électrique donné. Il m'est arrivé d'observer un phénomène contraire, lorsque je donnais à un fil de fer très-mince un grand nombre de torsions dans le même sens.

Pour étudier les effets de l'allongement, je n'ai qu'à prendre des fils de fer encore plus longs, les fixer solidement par une extrémité avec une grosse pince et les tendre à l'autre par un poids. Lorsque les deux spirales sont en équilibre, je tends un des fils par un poids de 10 kilogrammes, et à l'instant la spirale dans laquelle il est contenu, devient prédominante, et, en ôtant le poids, l'équilibre se rétablit. Si avec un plus grand poids l'allongement devient permanent, l'effet magnétique persiste aussi. Il faut arriver à des poids encore plus grands, pour qu'en produisant un allongement notable et enfin la rupture du fil, l'état magnétique vienne à diminuer.

Ainsi donc la cause des variations brusques dans l'état magnétique d'un barreau ou d'un fil de fer, occasionnées par la torsion ou par l'allongement, est de la même nature que celle qui fait varier le degré d'aimantation que ce même barreau peut prendre sous une action magnétique donnée, étant assujetti d'avance à ces actions mécaniques : en d'autres termes, toutes les fois que le dérangement de l'équilibre moléculaire, qui a lieu temporairement et par des causes différentes dans un barreau de fer, est accompagné d'une augmentation dans la force d'agrégation, on obtient une diminution dans son état magnétique ou dans sa susceptibilité à s'aimanter, tandis que si le dérangement moléculaire est accompagné par une diminution de cette force, la variation de l'état magnétique est en sens contraire.

Après avoir ainsi déterminé l'influence exercée par les forces moléculaires sur l'aimantation, il me reste à vous décrire deux observations importantes faites par M. Marianini, et qui ont une certaine analogie avec le sujet dont

l'hélice, fait voir que la variation de l'élasticité est à peine sensible.

M. Guillemin a observé qu'un barreau de fer doux sur lequel on a formé une hélice de fil de fer et qui est fixé par une de ses extrémités pendant qu'il est chargé à l'autre par un poids peu considérable qui le courbe légèrement, se redresse visiblement au moment qu'on fait passer un courant à travers l'hélice. On doit remarquer que, dans cette expérience, l'hélice est attachée au barreau, ce qui empêche de recourir à une action entre le fil et l'hélice pour expliquer le résultat; on a trouvé que, si le barreau avec l'hélice est appuyé avec son milieu sur un support, au lieu d'être serré ou fixé à une extrémité, le phénomène n'a plus lieu. Le résultat de l'expérience de M. Guillemin est très-net et constant, et je pourrais facilement vous le montrer en réunissant l'extrémité libre du barreau avec un fil de soie à la gorge d'une petite poulie portant un index, et autour de laquelle est enroulé le fil qui soutient ce poids; il faut recourir à des nouvelles recherches pour décider si le soulèvement du barreau dépend d'une action entre la partie fixe et celle qui est mobile ou d'une altération dans sa forme.

M. Joule a reconnu, avec un appareil dont le mécanisme est très-compliqué, qu'une barre de fer ou d'acier s'allonge d'une quantité très-petite lorsqu'elle est aimantée, et que cet effet diminue à mesure qu'on augmente la charge à laquelle cette barre est soumise pour y produire en même temps un allongement longitudinal; à partir d'une certaine limite et avec des charges croissantes, la barre ou le fil de fer se raccourcissent au moment de l'aimantation.

M. Wertheim, à qui nous devons les expériences les

plus exactes à ce sujet, a montré que le courant d'une hélice exerce sur une barre ou sur un fil de fer placés dans l'intérieur de celle-ci, une traction que l'on peut considérer comme résultante d'une force longitudinale et d'une force transversale. La force longitudinale qui s'exerce, quelle que soit la position de la barre de fer relativement à l'axe de l'hélice, tend à allonger ou à raccourcir cette barre, suivant que l'hélice est placée près de son extrémité libre ou un peu en dehors de cette extrémité; l'effet de l'hélice est notablement diminué lorsque celle-ci est placée près de l'extrémité fixe de la barre. La force transversale produit des effets très-sensibles lorsque la barre n'est pas dans l'axe de l'hélice, et, dans cette position, cette force devient nulle.

Je puis facilement vous montrer les effets de l'action mécanique que le courant d'une spirale exerce sur un barreau ou sur un fil de fer dans le sens de l'axe; pour cela, j'introduis ce fil, pour les deux tiers de sa longueur, dans la spirale, et je vois qu'au moment où le circuit est fermé, le fil est vivement *attiré* dans la spirale. Si, au lieu d'un cylindre massif, j'emploie un tube de fer contenant un cylindre du même métal, on verra ce dernier vivement *repoussé* en dehors au moment de l'aimantation.

Pour analyser ces phénomènes, il faut recourir à l'expérience fondamentale d'Arago. Je prends une lame de verre, sur laquelle je répands de la limaille de fer, et j'introduis cette lame dans une spirale cylindrique; au moment où je ferme le circuit, les particules de fer entrent en mouvement, paraissent repoussées par les parois de la spirale et se rassemblent en filets parallèles à l'axe. En renouvelant plusieurs fois le passage du courant, toute la limaille se réunit dans l'axe de la spirale et en plus

grande quantité vers son milieu qu'à ses extrémités. On peut varier cette même expérience, comme l'a fait M. Grove, en ayant du fer très-divisé suspendu dans une colonne d'eau qui est placée dans l'intérieur d'une spirale. Au moment où on ferme le circuit, le liquide, qui auparavant était troublé et ne laissait pas passer librement la lumière, s'éclaircit parce que les particules de fer se réunissent en filets parallèlement à l'axe de la spirale. Cette action du courant électrique de la spirale sur les particules de fer qui tend à les repousser vers l'axe où elles se rassemblent en filets longitudinaux, explique jusqu'à un certain point les forces longitudinales et transversales trouvées sur le barreau.

Nous concevrons maintenant sans difficulté comment une masse de fer soumise à l'aimantation temporaire doit produire une série de chocs et de sons, lorsque le passage du courant magnétisant de la spirale est renouvelé à des intervalles très-petits de temps. C'est, en effet, ce qui a été observé d'abord par M. Page et ensuite par MM. Gassiot, Beatson, Matteucci, Marrian, Wartmann, etc.; c'est surtout à MM. de la Rive et Wertheim que nous devons les expériences les plus étendues et les plus variées sur ce sujet.

Pour obtenir ces sons bien distincts, il faut tendre sur une table d'harmonie un fil de fer ou d'acier de 1 à 2 millimètres de diamètre et de 1 à 2 mètres de longueur, et disposer ce fil dans l'axe d'une bobine qui doit en être bien séparée; il faut aussi que le fil soit tendu par un poids modéré. On obtient le courant interrompu en faisant agir une roue d'interruption ou un *rhéotome* placé dans le circuit de la spirale, de manière à produire un certain nombre d'aimantations et de désaimantations sé-

parées par des intervalles de temps qui ne doivent pas être excessivement courts. Remarquons ici qu'on peut obtenir des sons, quoique moins clairs, que ceux produits par les fils, en employant une masse cylindrique de ce métal, qui pèse 10 à 15 kilogrammes, placée dans une spirale convenable.

On peut aussi obtenir des sons semblables en faisant passer un courant électrique discontinu à travers un fil de fer. Dans ce cas aussi la cause des vibrations doit consister dans l'action que le courant exerce sur les particules de son propre conducteur, et qui sont aimantées normalement à sa direction.

On a essayé inutilement d'obtenir des phénomènes semblables, en soumettant à l'action du courant discontinu, des fils de cuivre, d'argent, ou de tout autre métal non magnétique; le même résultat a été trouvé en faisant passer le courant discontinu dans ces fils.

Lorsqu'on fait attention aux sons produits dans les différentes manières que nous venons de décrire, on parvient sans difficulté à distinguer un son musical, qui est plus ou moins clair, suivant les conditions que j'ai indiquées, et, en même temps, un bruit sec ou une espèce de crépitation qui accompagne immédiatement la fermeture et l'ouverture du circuit.

Il est facile de constater, comme je l'ai prouvé dans le temps, que le son musical obtenu dans ces expériences est le son longitudinal de la barre ou du fil, identique avec celui qu'on obtient par le frottement. Si la barre est placée hors de l'axe de la spirale ou si le fil de fer n'est pas suffisamment tendu, le son longitudinal est moins pur, et on a en même temps un son transversal très-faible accompagné d'un mélange d'autres sons ou plutôt de bruits difficiles à déter-

miner. C'est surtout sur les plaques de fer que ces phénomènes compliqués se produisent, et cela principalement en faisant que les interruptions se succèdent rapidement.

Remarquons, en dernier lieu, qu'en général les sons musicaux sont moins clairs et distincts avec les fils d'acier ou de fer écroui qu'avec ceux de fer doux, et qu'on peut faire cesser les différents bruits obtenus par le courant discontinu, en tenant le fil de fer dans une hélice et en le faisant aimanter par un courant extérieur.

Il résulte de l'ensemble des expériences que je vous ai décrites sur la relation entre l'état d'aimantation du fer et de l'acier et les forces moléculaires, les conséquences suivantes :

1° L'action mécanique qui se développe entre le courant d'une spirale et un barreau de fer qui s'aimante dans l'intérieur de celle-ci, donne lieu à des forces qui tendent à allonger ou à raccourcir le barreau, ou à le déplacer transversalement lorsqu'il est dans une position excentrique. On doit attribuer cette action à une attraction analogue à celle qu'un conducteur voltaïque exerce sur la limaille de fer.

2° Les tractions longitudinales et transversales du barreau de fer qui ont lieu au moment de l'aimantation et de la désaimantation, produisent des sons.

3° Indépendamment de cette action mécanique de la spirale, le nouvel état magnétique du barreau est accompagné d'un dérangement moléculaire qui consiste probablement dans une nouvelle orientation des molécules, et qui est la cause des autres sons et bruits qui se produisent en même temps : ce dérangement moléculaire ne détermine aucune variation sensible dans la densité et dans l'homogénéité de la structure du corps aimanté.

4° Le nouvel arrangement moléculaire, qui paraît être lié essentiellement à l'état d'aimantation, est nécessairement influencé par l'état d'agrégation qui appartient aux corps soumis à la force inductrice ; plus les molécules de ces corps sont libres, plus est faible la force d'agrégation qui retient ces molécules en équilibre, et plus l'aimantation est facile à se produire et à cesser.

Il était important de rechercher si les corps diamagnétiques présentaient des phénomènes analogues à ceux que nous venons d'étudier dans ce fer.

C'est à MM. Knoblanch et Tyndall qu'on doit les premières expériences sur ce sujet. Ces physiciens ont préparé une lame de bismuth comprimé, en serrant avec la vis d'une petite presse un cylindre formé d'une pâte d'eau gommée et de poudre de ce métal ; cette lame suspendue entre les pôles de l'électro-aimant, au lieu de se fixer *équatorialement* avec sa plus grande longueur, se met au contraire dans la ligne polaire comme si elle était formée d'une matière magnétique. Suivant les mêmes physiciens, le contraire a lieu avec une plaque obtenue par la compression d'une pâte d'eau gommée et du carbonate de fer en poudre.

Pour répéter ces expériences, nous avons préparé un cylindre de bismuth en faisant fondre ce métal dans un tube de verre de 5 à 6 millimètres de diamètre ; sur ce cylindre, dont la cristallisation était confuse et irrégulière, on a taillé des petits cubes d'égale dimension. Un de ces cubes étant suspendu entre les pôles de l'électro-aimant, on le voit rester indifférent, quelle soit sa position et son mouvement au moment où le circuit est fermé. En substituant à celui-ci un autre cube semblable, qu'on a légèrement comprimé avec une presse, perpendiculairement

à deux de ses faces opposées, on trouve qu'il n'est indifférent à l'action de l'électro-aimant que dans le seul cas où la ligne de compression est dans le prolongement du fil de suspension. Si le cube est suspendu avec sa ligne de compression horizontale, on le voit au moment où le circuit est fermé se diriger et s'arrêter en équilibre avec cette ligne perpendiculaire à la ligne polaire. J'ai trouvé un effet semblable, quoique plus faible, sur l'acide stéarique.

M. Tyndall, en mesurant avec la torsion la force de répulsion que le pôle d'un électro-aimant exerce sur un cube de bismuth comprimé, a observé que cette répulsion est plus forte lorsque la ligne de compression est parallèle à l'axe de l'électro-aimant que lorsqu'elle lui est perpendiculaire.

Sur une masse de bismuth amorphe, qui a été comprimée uniformément dans un certain sens, je prépare des aiguilles prismatiques. Je suspends entre les pôles une de ces aiguilles, qui a la ligne de compression perpendiculaire à sa longueur et suspendue horizontalement; cette aiguille se dirige dans la ligne polaire, comme si elle était formée d'une substance magnétique. En faisant décrire un arc de 90° au point de suspension, la ligne de compression devient verticale, et on voit alors l'aiguille se fixer dans le plan équatorial.

Si l'on a des aiguilles de bismuth qui soient taillées de manière que la ligne de compression soit parallèle à leur longueur, on les voit se placer équatorialement; cette ligne étant suspendue horizontalement, la force diamagnétique mesurée par la durée de l'oscillation est la plus grande possible. Ces propriétés du bismuth comprimé persistent après avoir chauffé ce métal à une température qui

est très-près de celle du point de fusion, mais elles disparaissent par la fusion.

Remarquons encore que pour rendre plus distincts tous les phénomènes qu'on développe dans le bismuth par la compression, il est avantageux d'employer des surfaces polaires carrées et très-étendues au lieu de pointes ou de demi-sphères; lorsqu'on a des extremités coniques et très-rapprochées, les aiguilles de bismuth qui ont la ligne de compression perpendiculaire à leur longueur sont repoussées dans le plan équatorial, ce qui n'a pas lieu en éloignant ces extrémités ou en employant des surfaces polaires carrées. En décrivant les phénomènes magnéto-cristallins, nous verrons comment la forme et la distance des extrémités polaires produisent ces effets.

Il nous serait impossible, dans l'état actuel de nos connaissances, d'essayer quelque rapprochement entre les effets de la compression sur les propriétés diamagnétiques du bismuth et les phénomènes magnéto-moléculaires du fer. Nous devons plutôt nous empresser d'arriver aux phénomènes magnéto-cristallins, avec lesquels les phénomènes du bismuth comprimé paraissent avoir une certaine analogie.

On doit à M. Plucher la première expérience qui a prouvé la relation qui existe entre la position d'équilibre que certains corps magnétiques et diamagnétiques prennent entre les pôles d'un aimant et celle de leurs axes de cristallisation.

Cette expérience a été faite avec une plaque rectangulaire de tourmaline ayant son axe optique parallèle au côté le plus long, comme on l'emploie pour polariser la lumière. On sait que la tourmaline est attirée par l'aimant à cause de l'oxyde de fer qu'elle contient.

à deux de ses faces opposées, on trouve qu'il n'est indifférent à l'action de l'électro-aimant que dans le seul cas où la ligne de compression est dans le prolongement du fil de suspension. Si le cube est suspendu avec sa ligne de compression horizontale, on le voit au moment où le circuit est fermé se diriger et s'arrêter en équilibre avec cette ligne perpendiculaire à la ligne polaire. J'ai trouvé un effet semblable, quoique plus faible, sur l'acide stéarique.

M. Tyndall, en mesurant avec la torsion la force de répulsion que le pôle d'un électro-aimant exerce sur un cube de bismuth comprimé, a observé que cette répulsion est plus forte lorsque la ligne de compression est parallèle à l'axe de l'électro-aimant que lorsqu'elle lui est perpendiculaire.

Sur une masse de bismuth amorphe, qui a été comprimée uniformément dans un certain sens, je prépare des aiguilles prismatiques. Je suspends entre les pôles une de ces aiguilles, qui a la ligne de compression perpendiculaire à sa longueur et suspendue horizontalement; cette aiguille se dirige dans la ligne polaire, comme si elle était formée d'une substance magnétique. En faisant décrire un arc de 90° au point de suspension, la ligne de compression devient verticale, et on voit alors l'aiguille se fixer dans le plan équatorial.

Si l'on a des aiguilles de bismuth qui soient taillées de manière que la ligne de compression soit parallèle à leur longueur, on les voit se placer équatorialement; cette ligne étant suspendue horizontalement, la force diamagnétique mesurée par la durée de l'oscillation est la plus grande possible. Ces propriétés du bismuth comprimé persistent après avoir chauffé ce métal à une température qui

est très-près de celle du point de fusion, mais elles disparaissent par la fusion.

Remarquons encore que pour rendre plus distincts tous les phénomènes qu'on développe dans le bismuth par la compression, il est avantageux d'employer des surfaces polaires carrées et très-étendues au lieu de pointes ou de demi-sphères; lorsqu'on a des extremités coniques et très-rapprochées, les aiguilles de bismuth qui ont la ligne de compression perpendiculaire à leur longueur sont repoussées dans le plan équatorial, ce qui n'a pas lieu en éloignant ces extrémités ou en employant des surfaces polaires carrées. En décrivant les phénomènes magnéto-cristallins, nous verrons comment la forme et la distance des extrémités polaires produisent ces effets.

Il nous serait impossible, dans l'état actuel de nos connaissances, d'essayer quelque rapprochement entre les effets de la compression sur les propriétés diamagnétiques du bismuth et les phénomènes magnéto-moléculaires du fer. Nous devons plutôt nous empresser d'arriver aux phénomènes magnéto-cristallins, avec lesquels les phénomènes du bismuth comprimé paraissent avoir une certaine analogie.

On doit à M. Plucher la première expérience qui a prouvé la relation qui existe entre la position d'équilibre que certains corps magnétiques et diamagnétiques prennent entre les pôles d'un aimant et celle de leurs axes de cristallisation.

Cette expérience a été faite avec une plaque rectangulaire de tourmaline ayant son axe optique parallèle au côté le plus long, comme on l'emploie pour polariser la lumière. On sait que la tourmaline est attirée par l'aimant à cause de l'oxyde de fer qu'elle contient.

Voyons maintenant ce qui arrive en tenant cette lame suspendue par un fil de cocon entre les extrémités polaires de l'électro-aimant. Si le côté le plus long qui est dans le plan de l'axe optique est suspendu verticalement, la lame se place dans la ligne polaire comme le ferait un corps magnétique ; mais si la suspension est telle que la lame puisse osciller horizontalement, ou si le petit côté est vertical, les extrémités polaires étant à une certaine distance, on verra la lame repoussée des pôles se fixer dans le plan équatorial comme un corps diamagnétique. Remarquons tout de suite que si les extrémités polaires sont terminées en pointe et tenues très-rapprochées, la lame de tourmaline sera toujours attirée dans la ligne polaire, comme si l'influence de la cristallisation n'existait pas.

M. Plucher après avoir répété cette belle expérience en substituant à la tourmaline un grand nombre d'autres corps cristallisés, croyait être parvenu à démontrer que l'action de l'aimant sur ces corps est indépendante du pouvoir magnétique ou diamagnétique de leurs particules, et que, par une relation nouvelle existant entre les propriétés optiques et les magnétiques, tous les cristaux qu'on appelle *négatifs* ou *répulsifs* en optique ont leur axe repoussé, et que les cristaux *attractifs* ou *positifs* ont leur axe attiré dans la ligne polaire.

Parmi les observations de M. Plucher sur les phénomènes magnéto-cristallins, il en est une qui mérite d'être citée, c'est celle faite sur des cristaux de cyanite et d'oxyde de zinc, qui paraissent être dirigés par l'action magnétique de la terre. Un cristal de cyanite, sans qu'il ait été soumis d'avance à l'action de l'aimant, se dirige dans le méridien magnétique ; au contraire, un cristal d'oxyde de zinc est dirigé par l'action de la terre dans un plan perpendiculaire au méridien.

M. Faraday fit à peu près à la même époque que M. Plucher, des expériences sur les phénomènes magnéto-cristallins du bismuth et de l'antimoine.

Pour répéter ces expériences, il faut tailler sur des masses de bismuth bien cristallisé des cubes et des prismes, de manière que deux de leurs faces opposées fussent naturelles ou du clivage principal. On sait aujourd'hui que le bismuth ne cristallise pas sous la forme cubique, comme on l'avait cru, mais que ses cristaux sont des rhomboèdres. Quand on essaye de découvrir les clivages de ces cristaux, on les trouve dans trois plans dont un surtout fournit des surfaces très-larges et très-luisantes : le clivage correspondant à ce plan est perpendiculaire à l'axe cristallographique, et a été appelé *clivage principal.*

Prenons un morceau quelconque de bismuth cristallisé, et, après l'avoir fixé avec une très-petite quantité de mastic résineux à un fil de cocon, suspendons-le entre les pôles d'un électro-aimant. Au moment où le circuit est fermé, on voit le morceau de bismuth osciller et enfin pointer dans une direction constante; en faisant attention au clivage principal, on trouve que le morceau de bismuth est en équilibre lorsque la ligne perpendiculaire au clivage est horizontale et dans le plan polaire. Il n'y a qu'un cas dans lequel ce morceau de bismuth reste indifférent à l'action de l'aimant, c'est lorsque les clivages sont suspendus horizontalement et que la ligne qui, dans les autres positions, pointe entre les pôles, se trouve dans le prolongement du fil de suspension.

Pour nous former une idée bien claire des phénomènes magnéto-cristallins du bismuth, je suspends entre les surfaces polaires planes une aiguille de bismuth cristallisé

(*fig.* 25, n° 1) avec les clivages verticaux et perpendiculaires à l'axe, et je vois que l'action magnétique oblige cette aiguille à se diriger, comme le ferait un corps magnétique, suivant la ligne polaire. Il faudrait rapprocher beaucoup les pôles et employer des extrémités coniques pour que cette aiguille fût repoussée équatorialement. Si l'aiguille de bismuth suspendue entre les pôles a ses clivages parallèles à son axe et verticaux (*fig.* 25, n° 2), l'aiguille est fortement repoussée dans la ligne équatoriale. Enfin, en suspendant cette même aiguille avec les clivages dans un plan horizontal (*fig.* 25, n° 3), la répulsion a lieu comme précédemment, mais elle est beaucoup plus faible. Je crois utile de vous rapporter ici quelques nombres qui donnent la mesure de la force diamagnétique éprouvée par des aiguilles prismatiques de bismuth expérimentées dans ces deux dernières positions. J'ai fait osciller entre les faces polaires d'un électro-aimant, éloignées entre elles de 35 millimètres, trois aiguilles de bismuth cristallisé qui avaient la même longueur (18 $\frac{1}{2}$ millimètres) et des poids différents. Ces aiguilles avaient leurs clivages parallèles à l'axe, qui était suspendu tantôt verticalement et tantôt dans un plan horizontal.

Voici les nombres trouvés :

POIDS des aiguilles.	DURÉE de 20 oscillations avec les clivages verticaux.	DURÉE de 20 oscillations avec les clivages horizontaux.
1gr,350	41 $\frac{1}{2}$	70
1gr,120	40 $\frac{3}{4}$	64 $\frac{1}{4}$
8gr,150	52	136

J'ai fait osciller des aiguilles semblables de bismuth

amorphe et, toutes les autres circonstances étant égales, j'ai trouvé que la durée de l'oscillation de ces aiguilles était plus courte que celle des aiguilles cristallisées dont les clivages étaient suspendus horizontalement et beaucoup plus lente que l'oscillation des aiguilles suspendues avec les clivages verticaux.

Enfin, en mesurant la durée de l'oscillation d'une aiguille de bismuth ayant $18\frac{1}{2}$ millimètres de longueur et pesant $1,^{gr.}350$ dont les clivages étaient perpendiculaires à sa longueur et qui pointait dans la ligne polaire, j'ai trouvé que cette durée était beaucoup plus longue que celle des aiguilles de bismuth cristallisé avec les clivages parallèles à leur longueur, ou des aiguilles de bismuth amorphe. Dans une expérience comparative, la force qui faisait osciller l'aiguille cristallisée avec les clivages verticaux autour de la ligne équatoriale était six fois plus grande que celle qui agissait également sur une aiguille de la même longueur et du même poids qui pointait dans la ligne polaire.

Je ferai remarquer qu'il faut considérer ces résultats exprimant la valeur des forces exercées par l'aimant sur les aiguilles de bismuth cristallisé, comme indépendants de la réaction des courants induits dans la masse métallique oscillante sur l'aimant. Nous avons vu, en effet, qu'un barreau de cuivre qui oscille entre les pôles par la force de torsion du fil auquel il est suspendu et qui est bientôt arrêté dans ses mouvements par la réaction électro-magnétique, fait néanmoins ses oscillations dans le même temps qu'il les ferait s'il était soustrait à la force de l'aimant. Nous verrons, à la fin de ce cours, quelle est l'influence qu'on peut attribuer aux courants induits dans les phénomènes magnéto-cristallins.

Pour compléter l'exposition des expériences relatives aux phénomènes magnéto-cristallins du bismuth, je vous dirai encore ce qui se passe lorsqu'une aiguille prismatique de bismuth est formée de la réunion de plusieurs cubes de ce métal, dans chacun desquels deux faces opposées sont des clivages. Une aiguille formée de six petits cubes réunis avec une couche très-mince de mastic, ayant leurs clivages perpendiculaires à l'axe, se place sous l'action de l'aimant dans la ligne polaire : il n'y a qu'à tourner la position de chaque cube de 90 degrés pour obtenir une aiguille qui est fortemeut repoussée dans le plan équatorial. Les forces trouvées avec des aiguilles ainsi composées sont approximativement les mêmes que celles des aiguilles formées d'une masse continue. Si on avait suspendu séparément chacun des petits cubes, on les aurait trouvés indifférents à l'action de l'aimant lorsque les clivages étaient horizontaux, et au contraire fortement sollicités à se mettre avec leur axe cristallographique dans la ligne polaire lorsque les clivages étaient verticaux.

Tous ces mouvements des aiguilles et des cubes de bismuth cristallisé se produisent également, mais avec une intensité moindre en présence d'un seul pôle comme entre les deux pôles de l'électro-aimant.

Il résulte donc de toutes les expériences que je vous ai montrées que la cristallisation développe dans le bismuth de nouvelles propriétés magnétiques en vertu desquelles une aiguille prismatique de ce métal, suspendue horizontalement avec son axe cristallographique, est sollicitée à se placer avec cet axe dans la ligne polaire ou équatoriale suivant que les clivages sont perpendiculaire ou parallèles à sa longueur, et paraît ainsi attirée ou repoussée des pôles; dans ces différentes positions, la force qui l'anime est très-

différente et toujours en rapport avec la direction des clivages relativement à la ligne polaire.

Faraday avait été conduit à attribuer les phénomènes magnéto-cristallins du bismuth, de l'antimoine et de l'arsenic, à une nouvelle force qui n'aurait été ni attractive ni répulsive, et n'aurait eu d'autre effet que de donner aux corps cristallisés soumis à l'action magnétique une direction indépendante du pouvoir magnétique et diamagnétique de ces corps.

MM. Tyndall et Knoblanch, qui ont répété et varié les expériences de MM. Plucher et Faraday, ont suivi dans l'application de ces phénomènes une voie qui a dû paraître beaucoup plus simple et conforme aux règles de la philosophie naturelle.

Ces physiciens ont commencé par démontrer que les pouvoirs magnétiques ou diamagnétiques de la matière du cristal ne sont pas sans influence, comme M. Plucher l'avait d'abord affirmé, sur l'action que l'aimant exerce sur le cristal; au contraire, ils ont prouvé que des cristaux de carbonate de chaux pure ont leur axe repoussé de la ligne polaire, et que d'autres cristaux de carbonate de chaux, contenant des traces très-légères d'oxyde de fer, ont cet axe attiré par la ligne polaire. Ils ont également ajouté d'autres exemples destinés à montrer les anomalies et les exceptions qui existent dans la proposition générale de M. Plucher que je vous ai rapportée.

Voici maintenant comment MM. Tyndall et Knoblanch ont expliqué les phénomènes magnéto-cristallins, se fondant sur l'analogie qui existe entre les propriétés moléculaires développées artificiellement par la compression, et celles qui existent naturellement dans les cristaux. Appliquant aux cristaux les propriétés trouvées dans les corps

dont les clivages sont perpendiculaires à leur longueur. Pour rendre la conséquence de cette dernière expérience encore plus évidente, j'ai fixé deux cubes de bismuth, qui ont deux faces opposées naturelles et parallèles aux plans de clivage, aux extrémités d'un petit levier de verre ou de sulfate de chaux suspendu par un fil de cocon au milieu du champ magnétique entre les extrémités polaires d'un électro-aimant (*fig.* 26, et 27) : lorsque les deux cubes ont les clivages verticaux et perpendiculaires à la longueur de l'aiguille (*fig.* 26, n° 1), au moment où le circuit est fermé, l'aiguille est attirée, *quelle que soit la position* qu'elle occupe dans le champ magnétique, et se fixe en équilibre dans la ligne polaire. En faisant tourner les cubes dans un plan horizontal de 90 degrés (*fig.* 26, n° 2), l'aiguille est alors repoussée vivement dans la ligne équatoriale. Le même mouvement a lieu, mais avec une intensité plus faible, après avoir fait tourner les cubes dans un plan vertical de 90 degrés (*fig.* 26, n° 3). J'ai compté dix oscillations de l'aiguille dans les trois positions des cubes que je viens de décrire : pour l'aiguille (n° 1) qui se met axialement, les dix oscillations se font en $49\frac{1}{2}''$; pour l'aiguille (n° 2) qui se place équatorialement ce temps n'est plus que de 37″, et de 46″ pour la troisième aiguille.

Il me semble impossible d'expliquer ces mouvements du bismuth cristallisé en les attribuant, comme on a essayé de le faire, à la force répulsive de l'aimant qui, suivant l'expérience de M. Tyndall, s'exerce avec plus d'intensité parallèlement aux clivages que dans la direction perpendiculaire à ces plans.

Remarquons encore qu'on ne trouve pas constamment l'accord qui devrait exister, selon les idées de MM. Tyndall et Knoblanch, entre les phénomènes magnéto-cristallins et

les effets produits par la compression dans le bismuth, si l'on considère les plans de clivage et la ligne suivant laquelle la compression a eu lieu comme jouissant des mêmes propriétés.

Il nous reste à voir pourquoi les phénomènes magnéto-cristallins et ceux développés par la compression varient avec la distance et la forme des extrémités polaires. MM. Jyndall et Knoblanch ont été les premiers à faire remarquer que, si la distance entre les pôles est assez grande et si les surfaces polaires sont planes, l'aiguille cristallisée sera tout entière soumise à des forces magnétiques uniformes, ce qui doit, indépendamment de toute hypothèse, rendre prédominants les effets dus à la cristallisation; au lieu de cela, avec des pôles coniques et très-rapprochés l'action magnétique s'exerce presque exclusivement sur les parties de l'aiguille qui sont très-près de son milieu, comme si elle n'avait pas la forme oblongue et comme si elle était formée d'une substance amorphe.

Complétons enfin le cadre de nos connaissances sur la relation qui existe entre les forces magnétiques et les forces moléculaires par l'exposition d'une découverte pleine d'avenir et peut-être la plus importante parmi toutes celles que nous devons à Faraday; cette découverte nous a conduit, dans le champ très-étendu des phénomènes diamagnétiques, à une conclusion bien mieux déterminée, quant à la nature du dérangement de l'équilibre moléculaire produit par l'action de l'aimant, que celle à laquelle on était parvenu en considérant cette action sur les corps magnétiques.

Avant de vous montrer cette expérience, je dois vous rappeler la propriété optique désignée sous le nom de *polarisation circulaire*, découverte par Arago dans les

plaques de quartz, dont les lois et les applications très-importantes à la chimie et aux théories moléculaires sont dues aux recherches du plus savant et du plus infatigable des physiciens vivants. Ces plaques, taillées perpendiculairement à leur axe optique, agissent sur un rayon de lumière polarisée qui les traverse, en faisant tourner le plan de polarisation d'une quantité proportionnelle à leur épaisseur et dans un sens qui dépend de la structure cristalline du quartz : cette propriété appartient à un grand nombre d'autres corps solides et a été découverte par M. Biot dans des corps rendus liquides par la fusion ou dissous dans l'eau. C'est l'existence de cette propriété dans les corps liquides et gazeux, indépendamment de l'état de repos ou d'agitation de leurs masses, et sa constance pour une quantité donnée de matière active dissoute dans un corps indifférent quelconque qui, ont fait conclure que cette propriété émane des molécules constitutives des corps et ne peut être attribuée à des actions des groupes ou de certains arrangements moléculaires.

Faraday a découvert que la *polarisation circulaire* se développe dans certains corps solides et liquides sous l'influence de l'aimant.

L'appareil que M. Rhumkorff, suivant une bonne idée de M. Ed. Becquerel, a construit pour agrandir le phénomène découvert par Faraday, consiste en un électro-aimant très-puissant dont les pièces polaires sont traversées par un trou parallèle à la ligne des pôles. Il s'est servi de deux bobines électro-magnétiques dont le fer est percé dans sa longueur d'une petite ouverture pour laisser passer le rayon lumineux. Une lampe Locatelli envoie la lumière sur un prisme de Nicol et en polarise les rayons avant qu'ils traversent l'électro-aimant. Le faisceau po-

larisé, se propageant dans l'axe de la bobine, traverse le corps soumis à l'expérience, qui est placé entre les pôles opposés, et arrive à l'*analyseur*, qui est une autre prisme de Nicol, monté sur l'alidade d'un cercle divisé comme dans l'appareil très-connu de M. Biot. Un commutateur placé très-près de l'appareil permet à celui qui fait l'expérience d'interrompre et de rétablir brusquement le courant de l'électro-aimant.

Le corps que Faraday a employé dans sa première expérience est le *heavy-glass*, qu'il avait lui-même fabriqué pour le substituer dans les lentilles au *flint-glass* et qui est formé principalement de borosilicate de plomb.

On commence par ajuster les deux prismes de Nicol de manière à éteindre la lumière de la lampe qui est polarisée dans un plan fixe par le prisme antérieur ; cela étant fait, on s'assure que l'introduction d'un prisme de verre pesant entre les pôles contraires de deux bobines et sur la route du faisceau polarisé, n'a aucun effet sur le faisceau de lumière polarisée rendu invisible. Si alors on ferme le circuit de la pile, on voit à l'instant une image lumineuse apparaître et persister pendant tout le temps que le circuit reste fermé, et cesser immédiatement après l'ouverture du circuit. En faisant agir le commutateur, les alternatives de lumière et de ténèbres qu'on obtient deviennent plus faciles à saisir et rendent le phénomène plus distinct dans le cas où il pourrait être douteux, soit par la nature du corps expérimenté, soit par la faiblesse de la force magnétique. En observant alternativement l'image lumineuse qui apparaît au moment que le circuit est fermé, on voit cette image augmenter d'intensité et parvenir à son *maximum* après un temps qui, quoique très-court, est néanmoins bien distinct. Ce phénomène dépend princi-

palement du temps qui est nécessaire pour que la force magnétique atteigne son *maximum :* en effet, j'ai remarqué que le pouvoir rotatoire magnétique d'une couche d'eau n'est pas altéré en renouvelant très-rapidement cette couche. Pour nous assurer que le prisme de verre pesant acquiert sous l'influence de l'électro-aimant la propriété dont jouissent les plaques de quartz, c'est-à-dire celle de faire tourner le plan de polarisation, il suffit de remarquer que, pour éteindre l'image qui a apparu au moment où le circuit a été fermé, et qui persiste jusqu'à ce qu'on ouvre le circuit, il faut tourner le prisme analyseur à droite ou à gauche, d'un certain nombre de degrés.

Voici maintenant la loi que Faraday a trouvée pour la polarisation circulaire magnétique : *le plan de polarisation des rayons lumineux qui traversent un prisme de verre pesant placé entre les pôles d'un électro-aimant ou dans l'intérieur d'une spirale, tourne dans un sens qui est celui dans lequel est dirigé le courant magnétisant : cette rotation n'a lieu que lorsque le rayon polarisé traverse le verre pesant parallèlement à l'axe magnétique.*

Pour vérifier ces lois, il n'y a qu'à faire agir le commutateur tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre, de manière à renverser les pôles dans deux expériences successives ; on voit alors que pour éteindre l'image lumineuse, il faut tourner le prisme analyseur du même nombre de degrés dans des sens opposés.

Ces lois de la polarisation circulaire magnétique nous expliquent deux conséquences remarquables qui en résultent. Supposons d'avoir éteint l'image lumineuse pendant que le circuit était fermé et fixons à ce point le 0 degré de l'alidade. En ayant un commutateur qui d'un seul mouve-

ment produit l'inversion des pôles, comme M. Rhumkorff l'a exécutée, on trouve que la déviation du plan de polarisation ainsi obtenue est double de celle qu'on avait dans les expériences précédentes.

La seconde conséquence de ces lois, bien plus importante pour la théorie de ces phénomènes, est que, dans les corps qui exercent la polarisation circulaire magnétique, le sens de la rotation du plan de polarisation dépend seulement de la direction du courant de l'électro-aimant ou de la position des pôles; de cela, il résulte qu'en obligeant les rayons polarisés qui ont traversé une fois le prisme de verre pesant sujet à l'aimant à rebrousser chemin et puis à retourner encore du même côté, et ainsi de suite, la déviation définitive du plan de polarisation sera augmentée proportionnellement au nombre de ces trajets. Faraday a pu facilement réaliser cette conséquence de sa découverte en appliquant convenablement des surfaces réfléchissantes sur les deux faces du prisme de verre pesant. C'est ainsi qu'on a reconnu la polarisation rotatoire magnétique dans des corps qu'on avait considérés comme inactifs.

Parmi les corps solides qui acquièrent la rotation magnétique avec une certaine activité, viennent, après le verre pesant de Faraday, tous les silicates de plomb, le sel gemme et le verre ordinaire; il est digne de remarque que la rotation magnétique du verre augmente s'il contient du fer, du cobalt ou du nickel en petite quantité. Parmi les substances liquides, M. Ed. Becquerel, et ensuite M. Bertin, ont signalé le bichlorure d'étain, le sulfure de carbone et ensuite l'eau, l'alcool, l'huile, etc. En général, il paraît que le pouvoir rotatoire magnétique varie dans ces différents corps à peu près comme leur pouvoir

diamagnétique. Faraday, qui a étudié l'action de l'aimant sur les corps qui ont la polarisation circulaire naturelle, a trouvé que celle-ci s'ajoutait ou se retranchait de la rotation magnétique selon qu'elle était dans le même sens ou dans le sens opposé de la seconde.

Parmi les corps qui présentent la rotation magnétique la plus faible, il faut signaler les corps cristallisés et principalement ceux qui sont biréfringents, tels que le quartz et la carbonate de chaux.

Il paraît que M. Ed. Becquerel, en faisant répéter le passage du rayon polarisé un grand nombre de fois à travers le quartz, a réussi à rendre sensible la rotation magnétique dans ce corps. En général, on a trouvé que les corps doués des pouvoirs biréfringents les plus faibles étaient ceux qui prenaient les pouvoirs rotatoires les plus énergiques.

Je suis parvenu à un résultat semblable en agissant avec l'aimant sur des corps qui deviennent biréfringents par la compression : c'est ainsi que j'ai trouvé que le verre pesant, le flint et tous les verres, lorsqu'ils étaient comprimés avec une pince, normalement à la direction du rayon polarisé, perdaient considérablement de leur pouvoir rotatoire magnétique, tandis que ce pouvoir était augmenté quand on élevait le plus possible la température de ces corps. Il faut noter que le pouvoir rotatoire ne varie pas sensiblement lorsque la compression a lieu dans le même sens dans lequel le rayon se propage.

Nous devons encore noter que les solutions ferrugineuses concentrées ont un pouvoir rotatoire magnétique très-faible et moindre que celui de l'eau. On serait tenté de rapprocher de l'influence de la compression et de la cristallisation sur la rotation magnétique celle des trac-

tions très-fortes que les molécules des solutions ferrugineuses doivent éprouver dans le sens de l'axe magnétique.

J'ai enfin à vous décrire les résultats obtenus en étudiant expérimentalement la relation entre l'intensité de la force magnétique et la propriété rotatoire développée. Quoiqu'on eut pu admettre *à priori* la proportionalité entre cette force et la propriété rotatoire excitée, du moins, dans certaines limites, il était important de vérifier cette déduction théorique par l'expérience. C'est ce que M. Wiedemann a fait premièrement en employant un procédé très-simple qui consiste à placer le liquide transparent dans l'intérieur d'une spirale électrodynamique. Ce jeune et ingénieux physicien a observé qu'en faisant varier l'intensité du courant, le pouvoir rotatoire du liquide augmentait proportionnellement à cette intensité.

Une recherche semblable, tentée avec l'électro-aimant, devait être nécessairement plus difficile et compliquée. On sait, en effet, que les extrémités polaires des grands électro-aimants, qui ont ordinairement la forme conique ou hémisphérique, ne représentent pas les véritables pôles, c'est-à-dire les centres uniques des lignes ou courbes magnétiques, de sorte que, en faisant varier la distance des surfaces terminales polaires, on ne peut rien conclure quant à la variation de la force magnétique qui agit sur un point donné, placé entre les pôles. On éprouverait le même embarras en faisant varier la force du courant de l'électro-aimant, si on voulait en déduire immédiatement l'intensité de la force magnétique. Il est également facile de concevoir que, en ayant une masse transparente entre les pôles de l'électro-aimant, l'action magnétique ne peut être la même pour les différents points

de cette masse, et que les propriétés optiques observées ne seraient que l'effet résultant d'un ensemble d'actions inégales.

Voici comment M. Verdet a réussi à simplifier cette recherche et à confirmer le résultat de M. Wiedemann, tout en opérant avec l'électro-aimant. Rappelons ici les expériences que nous avons vues, dans la leçon précédente, en étudiant l'action de l'électro-aimant sur des masses liquides soustraites à l'action de la pesanteur. Imaginons d'avoir de très-petites gouttes d'huile suspendues au milieu d'un autre liquide qui soit ou magnétique, ou moins repoussé de l'huile, et plaçons ce mélange entre les pôles de l'électro-aimant, qui seront terminés par des surfaces planes très-étendues, carrées ou circulaires, de fer doux. En fermant le circuit, nous verrons les gouttes d'huile repoussées des différents points des surfaces polaires, en suivant les mêmes lignes partout et apparemment avec la même vitesse. On trouve le même résultat en employant des gouttes d'un liquide magnétique suspendues au milieu d'un liquide diamagnétique. On est ainsi amené à considérer l'espace compris entre des surfaces polaires très-étendues, comme un champ magnétique d'égale intensité, c'est-à-dire qu'une molécule de matière magnétique ou diamagnétique placée entre ces surfaces polaires, qui ne doivent pas être à une trop grande distance entre elles, y sera sollicitée par un système de forces dont la résultante variera très-peu, soit en grandeur, soit en direction, quelle que soit la position de cette molécule, excepté au voisinage des limites de ce champ. M. Verdet a trouvé, en effet, qu'un fragment d'une substance transparente, introduit dans cet espace, produit la même déviation du plan de polarisation, quel que soit le point qu'il occupe. Il a

également trouvé, comme il s'ensuit nécessairement, que les rotations produites par diverses épaisseurs d'une même substance, sous l'influence d'une même force magnétique, étaient exprimées par des nombres proportionnels à l'épaisseur. Il restait donc à faire varier l'intensité de la force magnétique, ce qui a été obtenu en changeant la distance des surfaces polaires ou en faisant usage d'une pile plus ou moins forte, et à déterminer en même temps cette intensité et le pouvoir rotatoire communiqué à un corps transparent. Pour la mesure de l'intensité de la force magnétique, M. Verdet a eu recours à un circuit induit qu'on fait tourner de 90 degrés, comme je vous l'ai montré dans la première leçon, en partant soit de la ligne polaire, soit de la ligne équatoriale. Le circuit induit consiste dans une petite bobine qui communique avec ses extrémités au galvanomètre, et qui est montée de manière à pouvoir tourner de 90 degrés autour d'un de ses diamètres. Si l'on place cette petite bobine dans un point quelconque d'un champ magnétique d'égale intensité, on trouvera partout le même courant induit en faisant tourner la bobine du même angle. Il est évident que les courants induits ainsi obtenus seront proportionnels aux forces magnétiques inductrices.

Les expériences de M. Verdet, dans lesquelles il a employé le *verre pesant* de Faraday, le flint ordinaire et le sulfure de carbone, ont démontré qu'il y a proportionalité entre l'intensité de la force magnétique et la rotation du plan de polarisation. Ainsi donc l'action exercée par l'aimant ou par le courant électrique, pour développer la propriété rotatoire dans une tranche élémentaire d'un corps transparent, varie, du moins dans certaines limites d'intensité de la force magnétique et pour les corps trans-

parents qu'on a expérimentés, avec la distance et l'énergie des centres magnétiques qui agissent sur ces corps, suivant une loi qui est la même que celle de cette action, lorsqu'elle s'exerce sur un circuit métallique pour développer un courant, ou sur une molécule de fer doux occupant la même position que la tranche considérée. Telle est la conclusion que la théorie avait déjà fait prévoir, et que MM. Wiedemann et Verdet ont établie sur des expériences rigoureuses.

CONCLUSIONS.

Nous avons successivement étudié dans ces leçons les différents effets développés par la force de l'aimant ou par celle du courant électrique, et nous avons principalement insisté sur la relation qui existe entre ces effets et la nature et la structure moléculaire des corps sur lesquels ces forces agissent par induction. Suivant, en quelque sorte, l'ordre dans lequel les phénomènes de l'induction magnétique ou électromagnétique se produisent, nous nous sommes d'abord occupé des courants électriques excités dans les métaux à chaque variation de la force inductrice, et dont la durée très-courte et la direction, au commencement et à la fin de l'induction, suffisent pour montrer qu'une variation dans l'équilibre électromoléculaire des corps induits a lieu en même temps. Nous avons ensuite décrit les phénomènes et les lois des actions réciproques qui se manifestent entre l'aimant et presque tous les corps de la nature, et qui diffèrent tellement entre elles par la grande énergie des forces polaires développées dans les substances magnétiques, comparativement aux effets très-faibles excités dans les corps diamagnétiques. En dernier lieu, nous

avons examiné la modification la plus intime que la force magnétique détermine dans la matière, et qui est la cause du *pouvoir rotatoire* communiqué en un degré différent à tous les corps qui laissent passer la lumière polarisée.

Je n'achèverai pas ce cours sans résumer en quelques propositions, fondées sur les expériences que je vous ai montrées, les résultats les plus importants auxquels on est conduit, et qui nous amènent à considérer sous un aspect nouveau la nature du magnétisme et sa relation avec les forces moléculaires.

I. L'hypothèse de deux fluides magnétiques ne peut être appliquée à l'explication des phénomènes diamagnétiques, dont l'existence suffit à prouver qu'il y a une contradiction nécessaire dans les principes de cette hypothèse, suivant qu'on considère l'action inductrice de l'aimant et la répulsion qui est la propriété de l'état diamagnétique. On ne peut, avec les mêmes fluides magnétiques et les propriétés qu'on leur attribue, expliquer en même temps les propriétés magnétiques et diamagnétiques et l'induction due à une force magnétique donnée qui décompose le fluide neutre d'une manière opposée dans le fer et dans le bismuth.

II. Il résulte des expériences décrites dans la quatrième leçon, que des masses formées de particules métalliques très-fines et isolées entre elles acquièrent, sous l'influence de l'aimant tournant ou mises en mouvement en présence de l'aimant, ces mêmes propriétés qui sont excitées avec une plus grande énergie dans les métaux, et qui constituent les phénomènes du magnétisme par rotation. Il est également prouvé que, au lieu de courants induits instantanés qui se développent dans les métaux à chaque variation de la force magnétique, les métaux acquièrent

les propriétés diamagnétiques lorsqu'ils sont réduits à l'état de grande division, de manière à empêcher la neutralisation des fluides électriques dans leur sein. On a encore déduit de l'expérience que la diminution des effets du magnétisme par rotation, qui est due à la division de la masse métallique induite, n'augmente pas proportionnellement à cette division au delà d'une certaine limite.

Nous pouvons donc admettre, comme une déduction presque légitime de l'expérience, que le premier acte de la force de l'aimant ou d'un courant électrique sur un corps quelconque, conducteur ou isolant, consiste à y développer *l'induction moléculaire*, c'est-à-dire un état électrodynamique de chaque molécule, dont l'action peut être représentée par celle d'un courant électrique tournant autour du corps induit, dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'électro-aimant, et en sens contraire au courant inducteur.

III. C'est encore une déduction de l'expérience, que les actions électrodynamiques s'exercent entre la matière des circuits parcourus par le courant voltaïque : en effet, nous avons vu qu'un électro-aimant très-puissant ne peut déterminer la moindre altération dans l'état électrodynamique d'une lame métallique ou d'une masse liquide parcourue par un courant et placée entre les pôles.

IV. On pourrait essayer d'expliquer avec une seule hypothèse les phénomènes diamagnétiques et le magnétisme de la manière suivante. La force de l'aimant ou du courant voltaïque développe dans tous les corps l'induction moléculaire, et par conséquent un état diamagnétique : suivant la nature du corps, sa structure et le nombre des atomes qu'il contient sous un volume donné, les forces électromotrices développées dans les molécules

pourront agir d'une molécule à l'autre, et donner lieu aux courants induits. Lorsque les courants moléculaires persistent, ils obéissent aux actions électrodynamiques ; et, comme on l'admet dans l'hypothèse d'Ampère pour s'expliquer l'aimantation, les molécules avec leurs courants, sont sollicitées à s'*orienter*, c'est-à-dire à placer leurs courants dans un plan parallèle à celui des courants inducteurs et dans la même direction. Dans cette hypothèse sur le diamagnétisme, qui est fondée sur les mêmes principes que celle d'Ampère, on est obligé d'admettre la persistance de forces électromotrices induites dans les molécules en présence de l'aimant inducteur ; lorsque l'équilibre électrique n'est que troublé pendant la variation de la force inductrice, la neutralisation des fluides rétablit cet équilibre par leur passage d'une molécule à l'autre.

Pour se représenter, dans cette hypothèse, un corps magnétique, il faut imaginer que, par sa nature et par le nombre des atomes qu'il contient sous un volume donné, les courants induits moléculaires y sont plus nombreux, plus intenses et plus rapprochés, et que leurs molécules cèdent plus facilement aux actions électrodynamiques, et parviennent à s'orienter plus ou moins complétement en surmontant les forces d'aggrégation et de cristallisation. En admettant ces propriétés dans les corps magnétiques, on peut s'expliquer l'existence et l'énergie de leurs forces polaires, la limite de l'induction magnétique, les sons du fer lorsqu'il est aimanté ou qu'il cesse de l'être, et l'influence de la chaleur, de la torsion et de l'allongement sur l'aimantation. D'accord avec ces principes et conformément à l'expérience, on doit se figurer les corps diamagnétiques comme plus faiblement sujets à

l'induction moléculaire, avec leurs éléments induits placés à une plus grande distance entre eux, et doués des forces d'aggrégation et de cristallisation capables de s'opposer à l'orien tation de leurs molécules. Cette même hypothèse peut répandre quelque lumière sur la cause des phénomènes magnéto-cristallins. Il est démontré par des expériences célèbres sur la propagation de la lumière, de la chaleur et des vibrations sonores dans les corps cristallisés, que ces corps possèdent des directions suivant lesquelles l'élasticité de l'éther et les forces d'aggrégation moléculaires sont plus grandes que dans d'autres. En faisant dépendre les propriétés magnétiques et diamagnétiques de l'induction moléculaire et de l'orientation des molécules, on conçoit que les corps cristallisés suspendus dans un champ magnétique uniforme doivent se placer en équilibre dans des positions qui seront dans une relation déterminée entre leur structure et les lignes de force magnétique. Rappelons ici les expériences que nous avons décrites dans la troisième leçon pour prouver que les phénomènes du magnétisme par rotation, présentés par certains métaux cristallisés, dépendent de la position des plans de clivage relativement à ces lignes.

Cette hypothèse sur la cause des phénomènes magnétiques et diamagnétiques doit être considérée comme un essai encore très-imparfait, contre laquelle on pourrait facilement élever un grand nombre d'objections.

V. En même temps que les phénomènes magnétiques et diamagnétiques se produisent, l'induction développe dans un grand nombre de corps des variations d'équilibre moléculaire. Presque tous les corps transparents, et principalement ceux qui sont à l'état liquide, ou les solides doués d'une structure homogène, acquièrent temporaire-

ment, en proximité de l'aimant, le pouvoir de faire dévier le plan de polarisation d'un rayon lumineux qui les traverse parallèlement à la ligne polaire. En vertu de ce pouvoir, qui varie proportionnellement à l'intensité de la force magnétique, et qui ne s'exerce que dans un plan perpendiculaire à la ligne polaire, la rotation du plan de polorisation a lieu dans le même sens du courant inducteur ou magnétisant. Dans les corps doués naturellement du pouvoir rotatoire et qui ont une structure homogène, l'action sur le rayon polarisé s'exerce quelle que soit la direction de ce rayon, et le sens de la rotation ne dépend que de cette direction, comme si la modification du milieu qui est la cause du pouvoir rotatoire, fût excitée par le rayon polarisé lui-même : lorsque c'est l'aimant qui développe cette propriété, le rayon polarisé obéit uniquement à la force inductrice, et la rotation de son plan a lieu dans la direction du courant inducteur.

L'expérience a démontré que le pouvoir rotatoire magnétique n'est excité que dans les corps solides ou liquides transparents ; dans les gaz, et encore moins dans le vide on n'a réussi à développer ce pouvoir, quelle que fût l'intensité de la force magnétique employée. Cela signifie que cette force agit sur l'éther dans les conditions de densité et d'élasticité dans lesquelles il se trouve, étant associé aux molécules pondérables et faisant partie de la constitution mécanique des corps. On conçoit ainsi comment la chaleur et les actions mécaniques, en altérant l'homogénéité de la structure et la distribution uniforme de l'éther, parviennent à modifier le pouvoir rotatoire magnétique. L'existence de ce pouvoir dans les corps liquides, lors même que leurs parties sont animées d'un mouvement très-rapide de translation, ou agitées indiffé-

remment en tous les sens, nous oblige à admettre que ce pouvoir est dû à une modification inhérente aux molécules et à leurs atmosphères d'éther, et que la structure et l'agrégation des corps n'influent qu'en laissant les molécules plus ou moins libres d'obéir à la force magnétique.

VI. Il est prouvé, par des expériences très-délicates, que l'action de l'aimant le plus fort n'est accompagnée d'aucune variation sensible dans la densité et dans la structure homogène des corps induits : tel est le résultat obtenu en soumettant à l'électro-aimant un volume donné de gaz oxygène ou d'une solution ferrugineuse. Ce même résultat a été obtenu en étudiant les propriétés de la lumière naturelle ou polarisée, après avoir été diffuse ou réfléchie plusieurs fois sur des lames de bismuth entre les pôles de l'électro-aimant. Il serait sans doute important de répéter les expériences de M. Foucault et de M. Fizeau sur la vitesse de la lumière dans des milieux soumis à l'induction magnétique ; mais on peut s'attendre à ne trouver aucune différence, comme il est arrivé avec le procédé très-délicat des franges d'interférence formées par deux pinceaux de lumière, dont l'un traverse un milieu assujetti à l'action de l'aimant. Ainsi donc l'induction magnétique n'altère sensiblement ni la densité des corps, ni la vitesse avec laquelle la lumière se propage.

Pour se représenter le pouvoir rotatoire magnétique, on est amené à supposer une altération dans la forme des atmosphères d'éther qui entourent les molécules, et une rotation ou un très-petit déplacement dans ces molécules ; c'est encore une orientation des molécules pondérables et de leurs atmosphères d'éther, excitée par l'aimant, qui serait la cause du pouvoir rotatoire magnétique.

VII. La science possède un certain nombre de faits qui

prouvent la relation existant entre les propriétés diamagnétiques de certains corps et leur pouvoir rotatoire magnétique. On sait, en effet, que le pouvoir rotatoire magnétique s'exerce dans un plan perpendiculaire à la ligne polaire, qui est aussi le plan dans lequel les corps diamagnétiques sont repoussés de l'aimant. Les corps les plus diamagnétiques sont, en général, ceux qui agissent le plus fortement sur la lumière polarisée, comme on l'a trouvé en comparant entre eux le sulfure de carbone, le bichlorure d'étain, le protochlorure de phosphore, certaines huiles et des verres contenant une grande proportion de matière diamagnétique; au contraire, le pouvoir rotatoire des solutions ferrugineuses est moindre que celui de l'eau, et d'autant moindre que le pouvoir magnétique du composé ferrugineux dissous est plus grand.

Les propriétés magnétiques et diamagnétiques et le pouvoir rotatoire sont donc les deux effets principaux de l'induction magnétique et électrodynamique; nous avons cru pouvoir déduire de l'expérience que ces deux effets consistaient dans une variation moléculaire des corps induits, c'est-à-dire dans l'*induction moléculaire* et dans une orientation des atmosphères d'éther qui entourent les molécules.

Poursuivre par de nouvelles expériences et par des études théoriques la découverte de la relation qui doit exister entre ces deux effets et l'induction magnétique, expliquer cette relation et rattacher par conséquent la force inconnue de l'électricité et du magnétisme à celle de l'éther distribué dans les corps, tel est le travail, préparé par les découvertes que nous avons étudiées dans ces leçons, qui donnera une grande et nouvelle impulsion à toutes les parties de la philosophie naturelle.

Indépendamment de toute hypothèse, il est désormais hors de doute qu'on ne pourra expliquer complétement les phénomènes magnétiques et électrodynamiques, sans faire intervenir l'éther faisant partie de la constitution mécanique des corps, sans s'appuyer par conséquent sur les théories de la physique mathématique les mieux établies.

TABLE DES MATIÈRES

Pages.

Origine et but de cet ouvrage. VII

PREMIÈRE LEÇON.

Phénomènes généraux de l'induction électrodynamique et électromagnétique. 1

DEUXIÈME LEÇON.

Lois de l'induction électrodynamique et phénomènes généraux de l'induction dans les masses métalliques en mouvement. . . . . , ... 44

TROISIÈME LEÇON.

Magnétisme par rotation. — Détermination des courants induits sur le disque d'Arago, et explication des forces qui s'exercent entre ce disque et l'aiguille aimantée. — Réaction des courants induits sur les forces inductrices. . . . 86

QUATRIÈME LEÇON.

De l'action de l'aimant tournant sur les corps magnétiques et sur ceux qui ne sont ni magnétiques ni conducteurs. 141

Pages.

CINQUIÈME LEÇON.

Action universelle du magnétisme. — Phénomènes diamagnétiques. — Polarités magnétique et diamagnétique. . 167

SIXIÈME LEÇON.

De la relation qui existe entre les phénomènes magnétiques et diamagnétiques et les propriétés chimiques et moléculaires des corps. 211

Conclusions. 267

PLANCHES I, II.

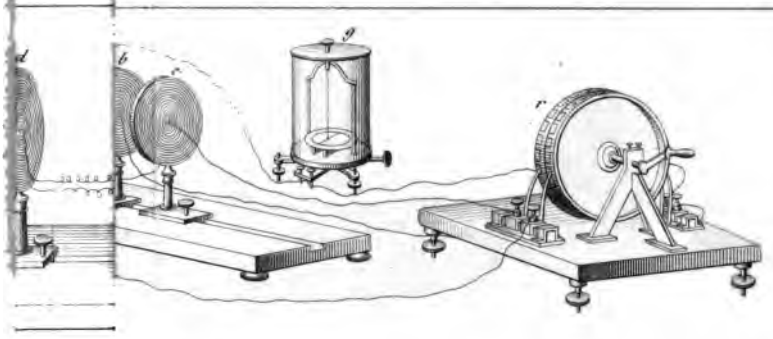


Fig. 3.

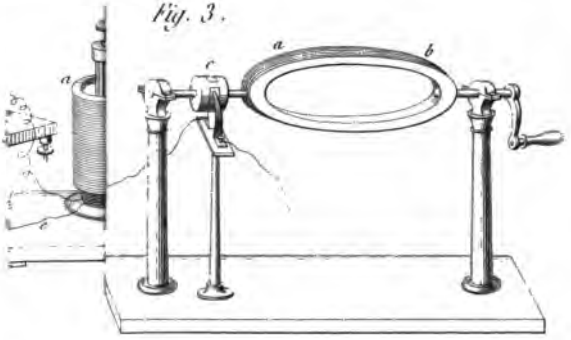
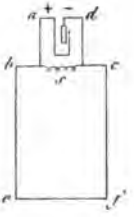


Fig. 4.



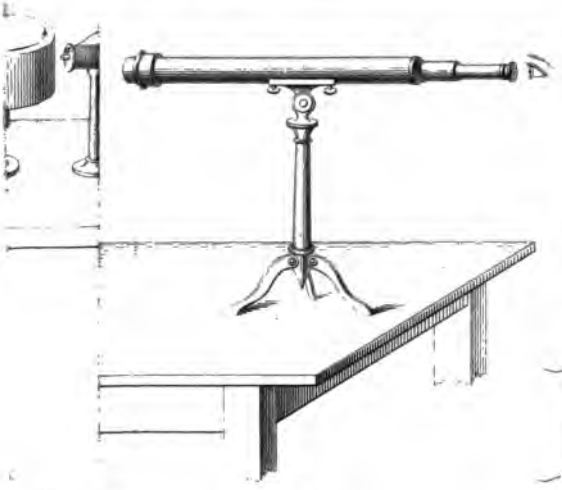
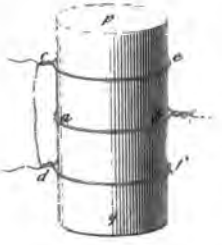


Fig. 6.



F. Pierucci del. Pelos. sculp.

Fig. 18.

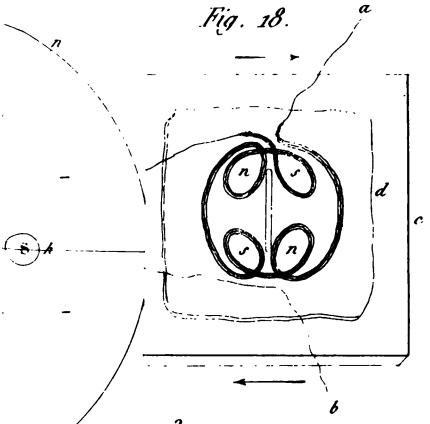


Fig. 19.

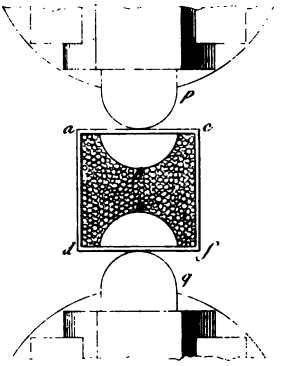


Fig. 30.

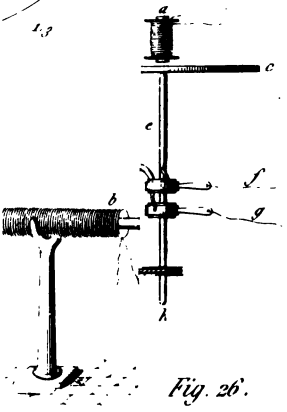


Fig. 27.

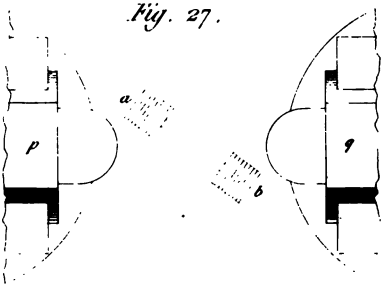


Fig. 26.

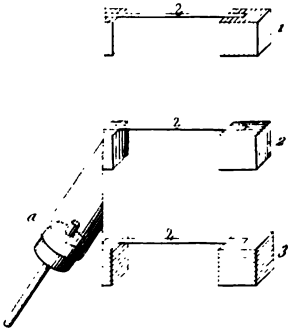
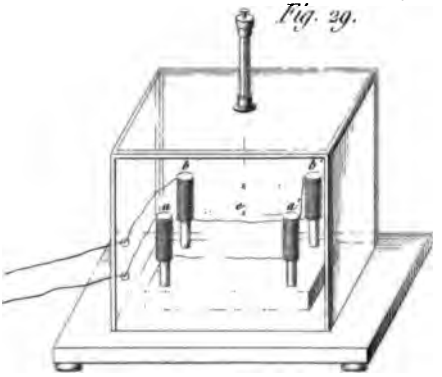


Fig. 29.



F. Pierucci del. Dalas sculp.